

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ PLAZMOU VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ

PLASMA WELDING OF HIGH-STRENGTH STEEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. EVA ŠKNOUŘILOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV KUBÍČEK

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Eva Šknouřilová

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Svařování plazmou vysokopevnostních ocelí

v anglickém jazyce:

Plasma welding of high-strength steel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Problematika svařování vysokopevných ocelí je stále aktuálnější. Snaha o co nejmenší ovlivnění vlastností spoje vede k využití speciálních metod svařování.

Cíle diplomové práce:

1. Analýza svařování plazmou
2. Problematika svařování vysokopevnostních ocelí
3. Návrh typů ocelí, parametrů svařování a zkoušek svarů
4. Provedení experimentu
5. Vyhodnocení zkoušek
6. Závěr

Seznam odborné literatury:

1. DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II, 2vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7
2. PILOUS, V. Materiály a jejich chování při svařování, 1vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009
3. BARTÁK, J. Výroba a aplikované inženýrství, 1vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009
4. KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
5. KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
6. KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5
7. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaroslav Kubíček

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 17.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

ŠKNOUŘILOVÁ Eva: Svařování plazmou vysokopevnostních ocelí.

Tato práce se zabývá plazmovým svařováním vysokopevnostních ocelí. Je rozdělena na dvě části, v teoretické je popsána metoda svařování plazmou a problematika svařování vysokopevnostních ocelí. V experimentální části se mnoha zkouškami ověřuje vhodnost zvolených materiálů a parametrů plazmového svařování klíčovou dírkou. Hodnocena byla kvalita a mechanické vlastnosti svarového spoje.

Klíčová slova: Svařování, plazma, vysokopevnostní oceli, HARDOX, DOMEX

ABSTRACT

ŠKNOUŘILOVÁ Eva: Plasma welding of high-strength steel.

This thesis deals with plasma welding high strength steels. It divided into two parts, the theoretical part described the problems of method plasma welding and welding of high strength steels. In the experimental part of the many exams test the suitability of selected materials and parameters of the keyhole plasma welding. An assessment of the quality and mechanical properties of welded joints.

Keywords: Welding, plasma, high-strength steel, HARDOX, DOMEX

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠKNOUŘILOVÁ, E. *Svařování plazmou vysokopevnostních ocelí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 27.5.2011

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za cenné připomínky a podporu při zpracování diplomové práce. Ráda bych také poděkovala a vyslovila uznání všem, kteří se podíleli na vzniku této práce.

OBSAH

ZADÁNÍ	
ABSTRAKT	
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ	
PODĚKOVÁNÍ	
OBSAH	

1. ÚVOD.....	10
2. TECHNOLOGIE PLAZMOVÉHO SVAŘOVÁNÍ	11
2.1 SVAŘOVACÍ PARAMETRY A SVAŘITELNOST.....	14
3. VYSOKOPEVNOSTNÍ OCELI A JEJICH SVAŘITELNOST	16
3.1 SMĚRY VÝVOJE VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ.....	17
3.2 SVAŘOVACÍ PROCES A JEHO OPTIMALIZACE.....	18
4. ÚVOD DO EXPERIMENTU A JEHO PARAMETRY	23
4.1 NAVRŽENÉ A ZKOUŠENÉ TYPY OCELÍ DOMEX A HARDOX.....	23
4.2 PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ.....	25
4.2.1 PARAMETRY PRO OCELI DOMEX 550, DOMEX 700 A HARDOX 400.....	26
4.2.2 PARAMETRY PRO OCEL HARDOX 550	29
4.3 PARAMETRY ŘEZÁNÍ VZORKŮ	31
5. PROVEDENÍ ZKOUŠEK A MĚŘENÍ	32
5.1 ZKOUŠKY TVRDOSTI DLE VICKERSE	32
5.1.1 TVRDOST SVAROVÉHO SPOJE	32
5.1.2 TVRDOST NA ŘEZNÉ HRANĚ.....	34
5.2 PŘÍČNÁ ZKOUŠKA TAHEM	36
5.3 ZKOUŠKA LÁMAVOSTI OHYBEM	38
5.4 METALOGRAFICKÁ ZKOUŠKA.....	42
5.4.1 MAKROSTRUKTURNÍ ANALÝZA SVARU	42
5.4.2 MIKROSTRUKTURNÍ ANALÝZA SVARU	43
6. TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU	49
7. ZÁVĚR	51
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	52
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	54

1. ÚVOD [14], [16], [22], [20]

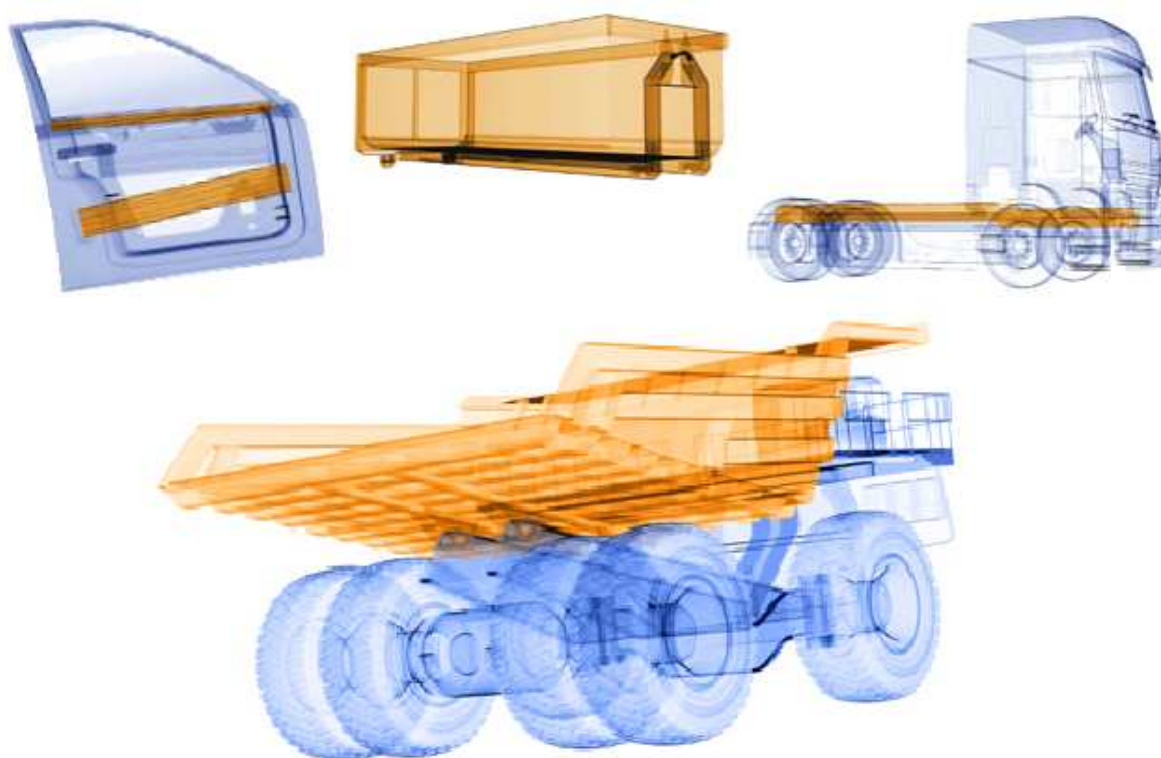
Základním požadavkem na všechny moderní procesy spojování materiálů je co vyšší výkon při současné úspoře investičních i provozních nákladů. Z tohoto pohledu je dnes analyzována většina procesů.

V oblasti svařování tenkých plechů se stává plazmové svařování významnou metodou především pro kvalitu spoje a rychlost svařování. Je charakterizováno velmi vysokou koncentrací energie a vysokou pracovní teplotou. Společným znakem všech oblastí použití svařování plazmou je vysoká kvalita a produktivita procesu při minimálním tepelném ovlivnění základního materiálu.

Problematika svařování vysokopevnostních ocelí je stále aktuálnější. S tím rostou požadavky na minimální ovlivnění vlastností svaru a vede k využití speciálních metod svařování, jako je například plazmové svařování. Příklady praktického využití vysokopevnostních ocelí jsou na obr. 1.1.

Při diskuzích o aplikacích vysokopevných konstrukčních ocelí je nutno si uvědomit, že nelze počítat s úsporou nákladů, pokud v konstrukci použijeme vysokopevnostní místo klasické oceli. Vysokopevnostní ocel je asi dvakrát až třikrát dražší, ale při dvojnásobné mezi kluzu. V současné době je převládajícím důvodem aplikací vysokopevných ocelí potřeba snížit hmotnost z jiných důvodů než je úspora nákladů na materiál.

Cílem této práce je navrhnout typy vysokopevnostních ocelí, parametry svařování a zkoušek svarů. Následné provedení s vyhodnocení zkoušek.



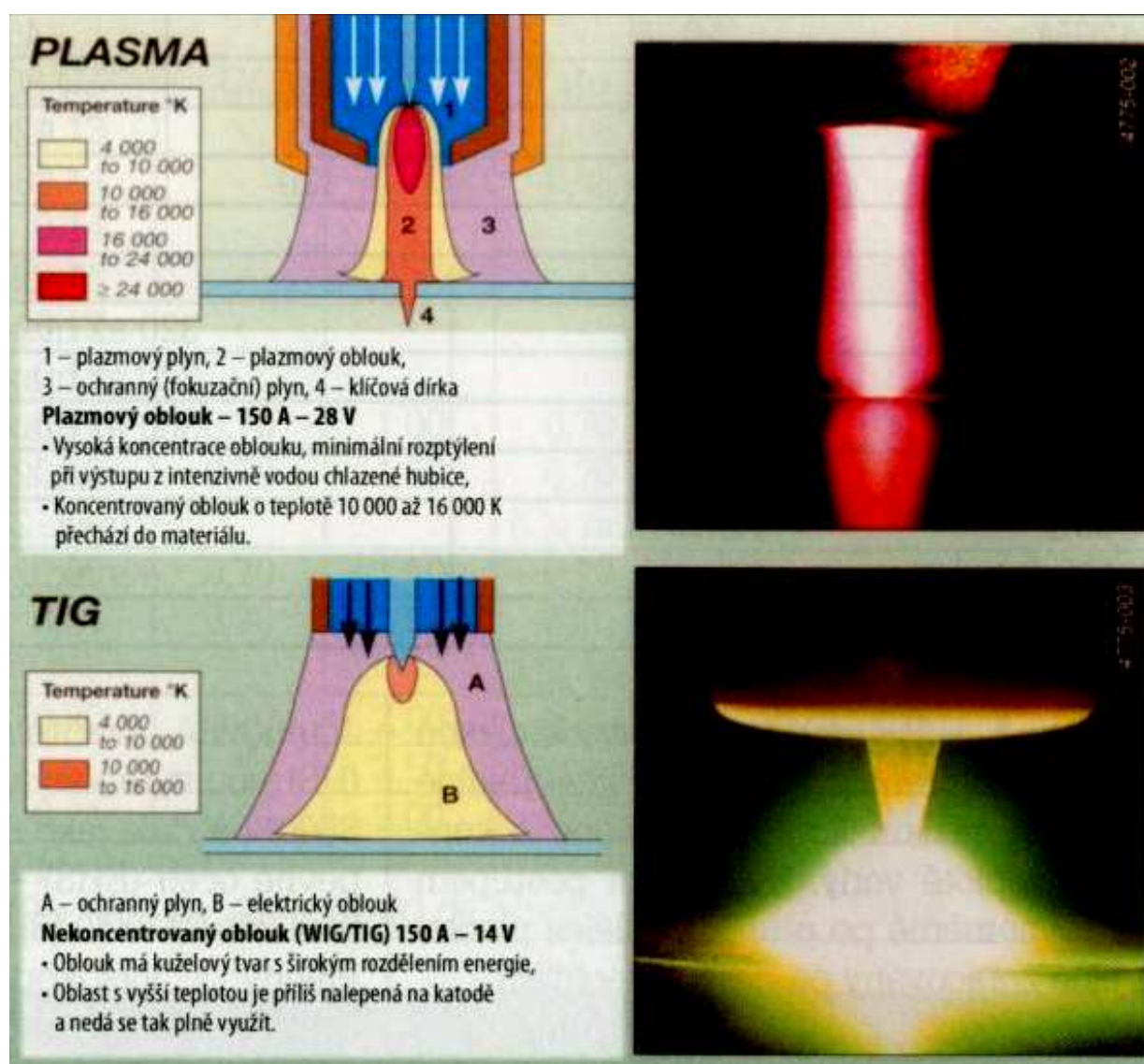
Obr. 1.1 Aplikace vysokopevnostních ocelí [16]

2. TECHNOLOGIE PLAZMOVÉHO SVAŘOVÁNÍ [4], [10], [22]

Základním požadavkem na všechny moderní procesy spojování materiálů je co vyšší výkon při současné úspoře investičních i provozních nákladů. Z tohoto pohledu je dnes analyzována většina procesů.

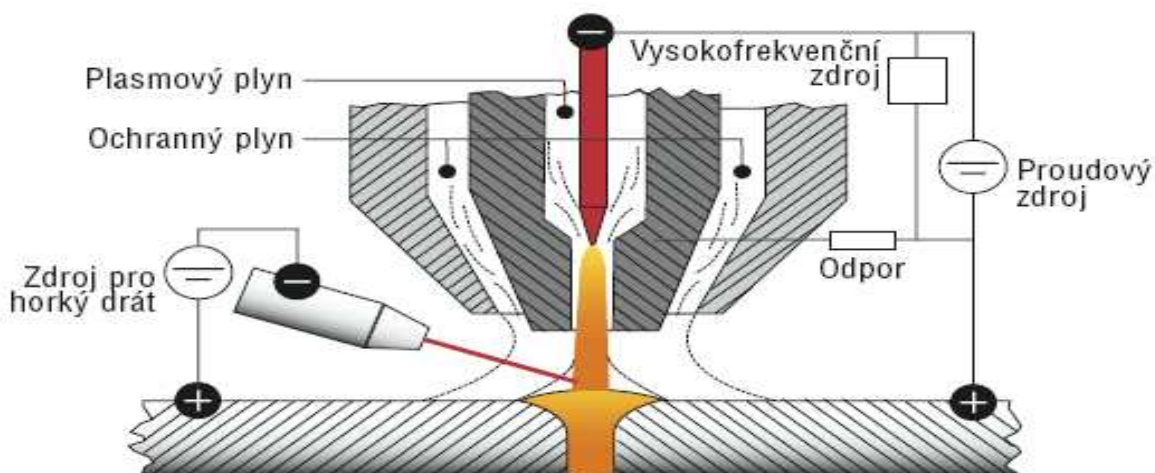
V oblasti svařování tenkých plechů znamená plazmové svařování – hodnoceno právě z pohledu nákladů – především pro kvalitu spoje a rychlost svařování významnou metodu, ležící mezi laserovým svařováním a konvenčními metodami svařování, jako je MIG/MAG nebo WIG svařování.

Plazmové svařování zajišťuje kvalitní spojování materiálů (svařování nebo letování) nebo navařování materiálů zejména u pevnostních ocelí, nerezových ocelí, titanových slitin bez nutnosti dalších víceprací.



Obr. 2.1 Příklady metody TIG a metody plazmového svařování [15]

Svařování plazmou (PAW - Plasma Arc Welding) je metoda velmi podobná TIG/WIG (obr. 2.1). Vznikla jejím vývojem a zaručuje vyšší produktivitu. Základní komponenty plazmového svařovacího hořáku jsou na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Základní komponenty plazmového svařovacího hořáku [5]

PAW se používá třemi způsoby:

1. Mikroplazmové svařování se svařovacím proudem 0,1 A - 20 A
2. Středněplazmové svařování se svařovacím proudem 20 A - 100 A
3. Svařování klíčovou dírkou (key hole welding), nad 100 A, kde plazmový oblouk proniká tloušťkou stěny a při posuvu svařovací trubice dochází vlivem povrchového napětí ke slévání roztaveného kovu v místě za "klíčovou dírkou"

Princip svařování plazmou je založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem. U dvouatomových plynů (dusík, vodík a kyslík) musí nejprve proběhnout disociace plynu, při které dochází k rozložení molekul plynu na atomy. Stupeň následné ionizace je závislý na teplotě a ta dosahuje u svařování plazmou až 16000°C.

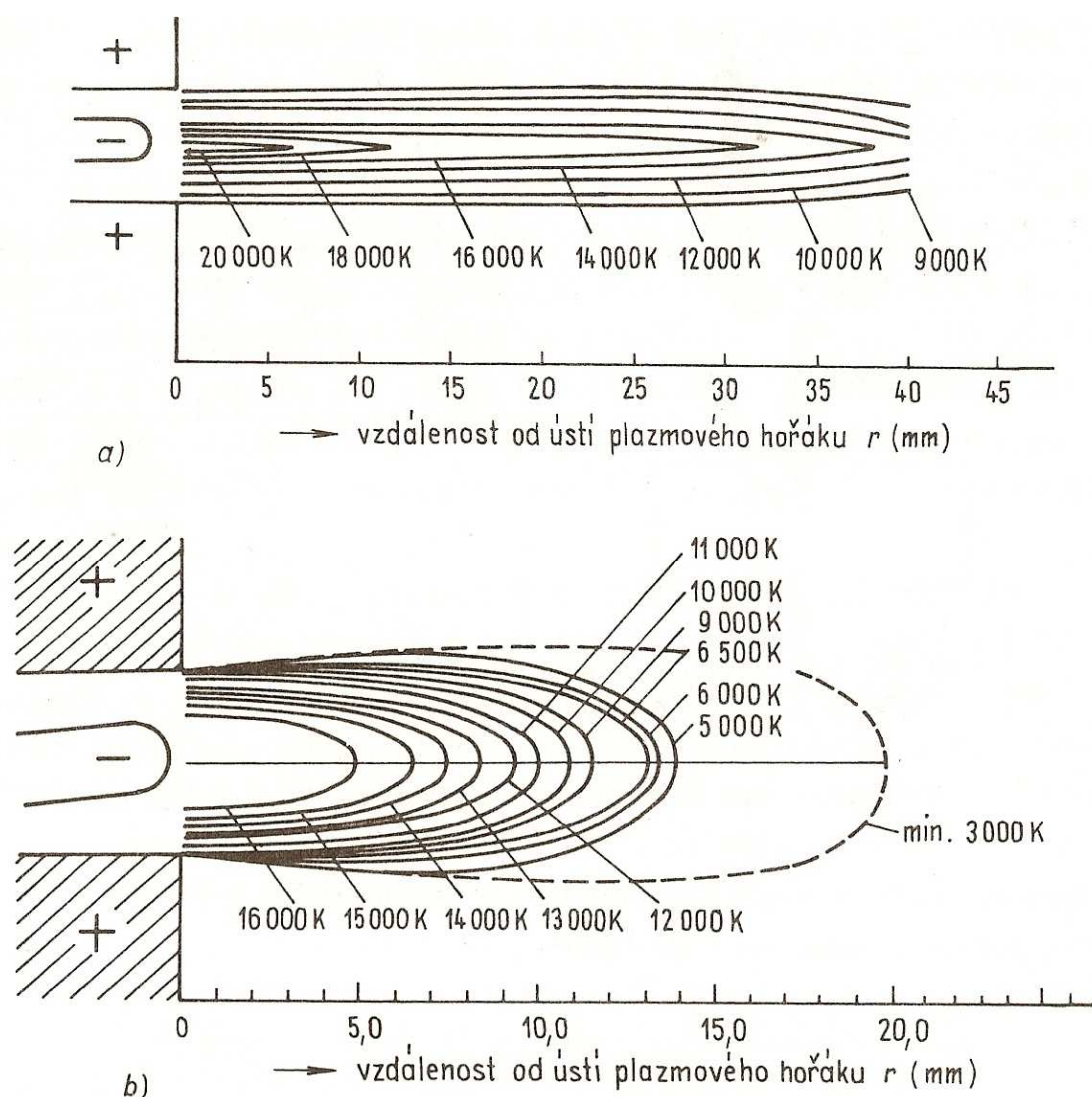
Při plazmovém svařování se obecně používají 3 druhy plynů:

1. plazmový: Ar, Ar + H₂, Ar + He, s průtoky 0,5 - 9,0 l/min.
2. fokusační pro zúžení plazmového paprsku, s průtoky 3 - 18 l/min.
3. ochranný plyn pro ochranu svarové lázně proti oxidaci, s průtoky 2 - 20 l/min, u aktivních materiálů Ti, Zr, Ta s průtoky 20 - 30 l/min.

Příklady průměrných teplot plazmy pro jednotlivá prostředí:

Dusíková plazma	do 9000K
Vodíková plazma	do 10000K
Argonová plazma	do 16000K
Heliová plazma	do 20000K
Plazma stabilizovaná vodou	do 35000K

Na obrázku obr. 2.3 pak můžeme vidět příklad rozložení teplot v paprsku plazmatu v některých plazmových plynech.



Obr. 2.3 Rozložení teplot v paprsku plazmatu,
a) argon-vodíkový plazmový plyn, b) dusíkový plazmový plyn [11]

Kromě plazmového a ochranného plynu se při svařování využívá ještě fokusační plyn, který zužuje paprsek. Ke kontrakci paprsku přispívá i zúžení výstupní trysky. Fokusační plyn bývá obvykle směs argonu s vodíkem nebo dusíkem.

V praxi používáme dvě možná elektrická zapojení hořáku, zapojení závislé (přenesený oblouk) a zapojení nezávislé (nepřenesený oblouk). U zapojení závislého obr. 2.2 je záporný pól připojen k elektrodě a kladný ke svařenci. Pro zapálení hlavního oblouku se používá pomocný oblouk, který vytvoří dostatečně vodivé prostředí pro vytvoření hlavního oblouku i na delší vzdálenost. Toto zapojení se používá především pro svařování navařování a řezání. U nezávislého zapojení se póly připojí k elektrodě a ke kovové trysce. Využívá se u žárových nástřiků a povrchového kalení.

Dvouatomové plyny mají velkou tepelnou kapacitu a vysokou spotřebu energie, která je vynaložena na disociaci. Spolu s vysokou tepelnou vodivostí vodíku tím odebírají teplo z vnějších vrstev plazmového paprsku. Plazma se tím zužuje, zvyšuje se její teplota a tím i stupeň ionizace a elektrická vodivost. Při kontaktu plazmy s materiálem dojde k ochlazení, to vede k opačnému procesu takzvané rekombinaci. Při rekombinaci dochází ke slučování elektronů s ionty zpět na atomy. Účinnost přenosu akumulovaného tepla do materiálu je 70 až 80%.

Při ohřevu plazmového plynu obloukem se několikanásobně zvětšuje jeho objem a to vede k vysokým výstupním rychlostem plazmy. Při svařování musí být dodržena rovnováha mezi dynamickým účinkem dopadající plazmy a povrchovým napětím taveniny, kvůli případnému vyfukování taveniny ze spáry. Výstupní rychlosti plazmy při svařování bývají asi 200 až 500 m/s.

2.1 SVAŘOVACÍ PARAMETRY A SVAŘITELNOST [7], [10], [15]

Svařitelnost materiálů i parametry svařování jsou u plazmového svařování podobná jako u metody WIG. Plazmové svařování však dosahuje vysokých svařovacích rychlostí, výhodnější poměr šířky k hloubce (1:1,5 až 1:2,5) a spolehlivé provaření kořene. Svařují se všechny druhy ocelí, měď, hliník, titan, nikl molybden a jejich slitiny. Parametry svařování vysokolegovaných ocelí se pro tloušťky 2 až 10 mm pohybují v těchto rozmezích: napětí mezi 28 až 40 V a svařovací proud mezi 110 až 300 A. Podobné parametry se používají i pro svařování niklu a jeho slitin a pro svařování titanu jsou přibližně o 15 až 20 % nižší. Svařovací rychlosti jsou ve srovnání s metodou WIG podstatně vyšší a pro uvedené parametry se pohybují mezi 85 až 20 cm.min⁻¹. Pro materiály náchylné k přehřívání používáme impulsní proud.

Základní parametry plazmového svařování jsou svařovací proud, rychlost toku plazmového plynu a svařovací rychlost:

- Svařovací proud ovlivňuje vlastnosti svarů prostřednictvím výstupního tlaku plazmy a teploty. Zvýšením napětí proudu se svar rozšiřuje jak na povrchu, tak v oblasti kořene svaru. Jestliže je svařovací proud vzhledem k ostatním parametrům (rychlost svařování, tloušťka materiálu) příliš vysoký, způsobuje přílišnou penetraci svarové lázně. Podobný účinek může mít i příliš nízký svařovací proud. Podobné vlivy na svařovací proces má i tlak a průtok plazmového plynu, je tedy zapotřebí tyto dva parametry sladit tak, aby bylo dosaženo požadovaného spoje.
- Rychlost toku plazmového plynu souvisí s kinetickou energií oblouku a týká se také hloubky penetrace. Úměrně s rostoucí tloušťkou materiálu nebo rychlosti svařování se zvyšuje i rychlost toku plazmového plynu. Rychlost toku plazmového plynu se obvykle pohybuje v rozmezí 1 až 3,5 litrů za minutu podle druhu a tloušťky materiálu.
- Svařovací rychlost určujeme obvykle v poměrně úzkém rozpětí. Toto rozpětí svařovací rychlosti závisí na dalších parametrech svařování. Při volbě příliš vysoké rychlosti dochází k vysoké penetraci, to ovšem nelze kompenzovat zesílením proudu nebo použitím plynu s vyšší tepelnou vodivostí.



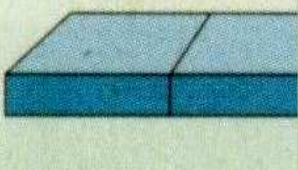
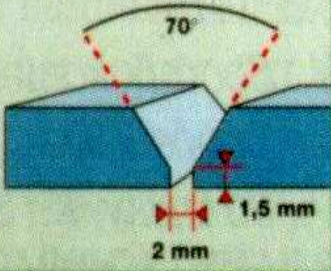
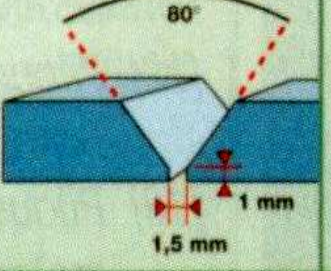
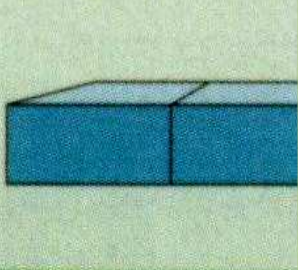
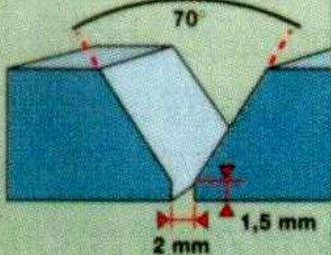
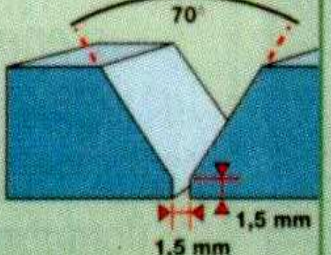
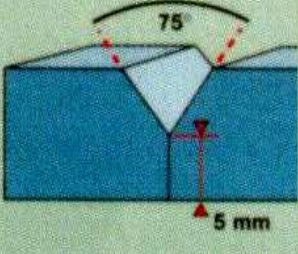
Kromě těchto hlavních parametrů plazmového svařování mají v praxi na svařování vliv i další parametry jako například složení plazmového a ochranného plynu, napětí v oblouku, rychlost posuvu svařovacího drátu, konstrukce hořáku, příprava drážky, čistota materiálu, no způsob seřízení svařovací aparatury.

Úprava svarových ploch pro plazmové svařování

Vzhledem k vysokému dynamickému účinku plazmového paprsku je možné svařovat tupé svary typu I se spolehlivým provařením kořene do větších tloušťek bez úpravy svarového úkosu.

Nerezavějící austenitická ocel se svařuje bez úpravy úkosu do tloušťky 10 až 12 mm s mezerou 0,5 až 1 mm a s plynovou ochranou kořene formovacím plynem. Pro nelegované a středně legované oceli se neupravují hrany do tloušťky cca 6 mm.

Porovnání přípravy výroby pro plazmové svařování s přípravou pro svařování obalenou elektrodou a metodou TIG vidíme na obr. 2.4.

Tloušťka	Obalená elektroda	TIG	Plazma
3 mm			
8 mm			
> 8 mm			

Obr. 2.4 Porovnání přípravy výroby [15]

Výhody plazmového svařování

- vyšší rychlost svařování
- menší tepelně ovlivněnou oblast, a tím i menší deformace
- menší převýšení svaru, a tím i snížení pracnosti následného opracování svaru
- zachování příznivých mechanických hodnot základního materiálu
- vynikající vzhled svaru při snadné reprodukovatelnosti
- vynikající kvalitu svaru (rentgenovou čistotu)
- snížení pracnosti přípravy svarových ploch
- do tloušťky 8 mm není nutné svarové plochy úkosovat
- lze svařovat jedním průchodem a pouze z jedné strany
- úspora přídavného materiálu
- svařování bez podložení kořene
- možnost mechanizace
- dobré mechanické vlastnosti svarového spoje
- možnost svařování střídavým i impulsním proudem

3. VYSOKOPEVNOSTNÍ OCELI A JEJICH SVAŘITELNOST [1], [12], [16], [17], [18], [20]

Vývoj i aplikace v oblasti konstrukčních materiálů vede v posledních letech k většímu použití ocelí s vyšší pevností. Také výrobní praxe směřuje k větší aplikaci ocelí vyšších a vysokých pevností a ořezuvzdorných materiálů. Spotřeba těchto ocelí v posledních několika letech ve světě i v České republice vzrůstá a tyto materiály se stávají běžnými.



Obr. 3.1 Příklady použití vysokopevnostních ocelí HARDOX, WELDOX a DOMEX [12], [16], [17], [18]

Normativní podpora v této oblasti již byla vytvořena. Ukazuje se, že i vývoj cen těchto ocelí je velmi příznivý a že v mnoha případech jejich použití je hospodárnější než použití ocelí běžných jakostí. Vhodné jsou zejména pro velké konstrukce, jako jsou mosty, haly velkých rozpětí, výškové budovy apod., ale lze je hospodárně využít i pro menší konstrukce. Oceli vysokých pevností lze využívat pro namáhané díly speciálních konstrukcí pro zařízení na těžbu a dopravu rud a uhlí a jejich části a části ostatních důlních zařízení, příklady použití vidíme na obr. 3.1.

Podstatou výroby jemnozrnných ocelí je jejich termomechanické zpracování při válcování. V zásadě je lze začlenit do čtyř skupin, jak je znázorněno v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Rozdělení termomechanicky zpracovaných ocelí [1]

	Skupina kalených ocelí	Některé obchodní značky	Základní mechanické vlastnosti	Další mechanické vlastnosti	Podstatné technologické vlastnosti
I.	Vysokopevnostní konstrukční oceli	WELDOX DOMEX ALFORM	$Re=700\div 1100\text{MPa}$	Houževnatost	Svařitelnost Ohýbatelnost
II.	Otěruvzdorné oceli	HARDOX XAR	$Tvrdost=400\div 600\text{HB}$	Houževnatost	Svařitelnost Obrobitelnost Ohýbatelnost
III.	Pancéřové oceli	ARMOX	$Tvrdost=340\div 600\text{HB}$	Houževnatost	Svařitelnost
IV.	Nástrojové oceli	TOROX TOOLOX	$Tvrdost$ 33HRC 44HRC		Obrobitelnost Teplotní stálost

V současné době můžeme rozdělit vysokopevnostní konstrukční oceli do dvou hlavních skupin. Do úrovně meze kluzu $Re=500\text{ MPa}$ včetně, jsou tyto oceli nekalené a jsou zahrnuty v EN 10 113. V označení SSAB Oxelösund jde pak o ocelové plechy WELDOX 420, WELDOX 460 a WELDOX 500 (uvedené číslo znamená zaručovanou hodnotu meze kluzu). Kalené „pravé“ vysokopevnostní oceli pak mají mez pevnosti R_m od 690 MPa a jsou zahrnuty v EN 10 137. V označení WELDOX jsou to pak stupně 700, 900 a 960. Nejpevnější konstrukční ocelí je v současné době ocel WELDOX 1100 s mezí kluzu $Re=1100\text{ MPa}$, která není ještě zahrnuta v evropských normách. Zásadní rozdíl v mechanických vlastnostech mezi „klasickou“ konstrukční ocelí a vysokopevnostními oceli je zejména v mezi kluzu a mezi pevnosti. Ostatní zaručované mechanické vlastnosti (tažnost a vrubová houževnatost) zůstávají na přibližně stejné úrovni.

3.1 SMĚRY VÝVOJE VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ [1]

U „klasických“ nelegovaných konstrukčních ocelí jsou mechanické vlastnosti určovány především obsahem uhlíku a manganu, obecně můžeme říci, že jsou zpevněny především substitučním a intersticiálním mechanismem.

Zvýšení meze kluzu a meze pevnosti nelegovaných konstrukčních ocelí, při zachování jejich dobré houževnatosti a současně potlačení vlivu uhlíku na jejich svařitelnost, lze dosáhnout jejich dolegováním malými obsahy prvků jako Al, Ti, Nb a V.

Působení těchto prvků spočívá v umožnění vzniku jemnozrnné struktury a navíc svou vazbou na uhlík a dusík formou precipitačního zpevnění zvyšují pevnostní vlastnosti materiálů. Tyto oceli nazýváme jemnozrnné. S ohledem na velmi malá množství těchto legujících prvků, běžně jsou limitovány hodnotami – $Al_{\min} 0,015\text{ hm } \%$, $Ti_{\max} 0,15\text{ hm } \%$, $V_{\max} 0,1\text{ hm } \%$ a $Nb_{\max} 0,04\text{ hm } \%$ (celkové množství legur se pohybuje v rozmezí 0,15 až 0,25 %), jsou tyto materiály označovány jako mikrolegované jemnozrnné oceli.

Z klasických konstrukčních svařitelných ocelí, systematickým zvyšováním meze kluzu, byly vyvinuty nízkolegované, jemnozrnné materiály s vyšší pevností. Vznikla skupina svařitelných vysokopevnostních ocelí, v literatuře označovaných HSS (High Strength Steel). Tyto oceli jsou ve výrobních programech všech světových producentů.

Budoucnost vysokopevnostních ocelí

Zdrojem vzrůst pevnosti je zvýšení podílu tvrdých fází vedle měkkých fází. Dvojfázové oceli se skládají z feritu a až 20 % martenzitu. Mezi další směry vývoje patří TRIP oceli. Přejít k ocelím s vysokou pevností v tahu (přes 800 MPa) spočívá v použití multifázových ocelí. Struktura těchto ocelí je složena z většího podílu tvrdých fází s jemnými precipitáty vedle měkkých fází. Celá mikrostruktura je pak velmi jemná.

Další vývoj je reprezentován konceptem částečně martenzitických ocelí. Je-li podíl martenzitu vyšší než 20 %, tyto oceli vykazují relativně nízkou mez kluzu, ale vysokou mez pevnosti. Nejvyšší mez pevnosti 1 400 MPa může být dosažena u čistě martenzitických ocelí.

Nejrealističtější směr vývoje je snižování velikosti zrna a vícefázová struktura. Nebezpečím při extrémním snižování velikosti zrna je ale jev, při kterém se mez kluzu blíží mezi pevností. Překonat tento problém lze použitím právě vícefázové struktury.

Široké uplatnění při výrobě zařízení na dopravu rud a uhlí mají otěruvzdorné termomechanicky kalené materiály.

Základní vlastností této skupiny termomechanicky kalených ocelí je tvrdost (otěruvzdornost těchto plechů je většinou dána jejich tvrdostí), která je v rozmezí 400 až 600 HB. Podstatou výroby těchto jemnozrnných, termomechanicky zpracovaných plechů je zvládnutí intenzivního zakalení celého průřezu plechu. Právě kalení plechů spolu s vysokou výchozí čistotou oceli nejvýrazněji rozhoduje o výsledných vlastnostech plechů. Podstata válcovacího kalícího lisu spočívá v tom, že žhavý ocelový plech je tažen válci přes zóny vodních trysek rozdílných tlaků. Plech je kalen za pohybu a celá jeho plocha je na rozdíl od statického kalícího lisu zakalena rovnoměrně. Tlak vody v kalících tryskách je tak velký, že proud vody „odfukuje“ parní polštář, který vzniká v první etapě kalení a tím výrazně snižuje dobu potřebnou k ochlazení plechů. Tento postup pak umožňuje docílit vysokých otěruvzdorných vlastností plechů bez přidávání většího množství legujících přísad, což výrazně zlepšuje zejména svařitelnost těchto ocelí. Do tloušťky 25 mm mají např. oceli HARDOX 400, 450 a 500 stejnou nebo lepší svařitelnost než ocel S355J2.

3.2 SVAŘOVACÍ PROCES A JEHO OPTIMALIZACE [1], [6], [16], [20]

Parametry svarového spoje jemnozrnných vysokopevnostních ocelí zásadně ovlivňuje:

- volba přídatného materiálu a ochranného plynu; přídatný materiál se volí s ohledem na požadované parametry svarového kovu a podmínky svařování – vnesené teplo, přechodovou oblast, tepelné zpracování apod.,
- metoda svařování,
- bezchybné provedení svarového spoje.

Pro svařování vysokopevných jemnozrnných materiálů se používají zejména tyto metody svařování:

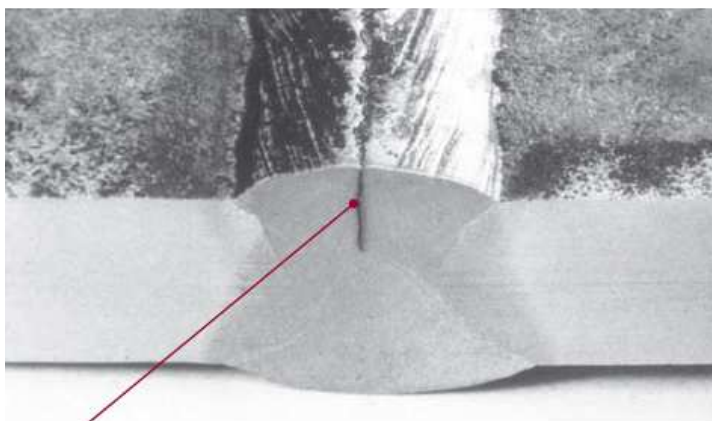
- ruční svařování obalenou elektrodou (MMA)
- svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře (MAG)
- svařování pod tavidlem (SAV)

Podstatným problémem u svařování jemnozrnných vysokopevnostních materiálů je zamezení vzniku vad typu studené trhliny a trhliny za horka na obrázcích 3.2 a 3.3.

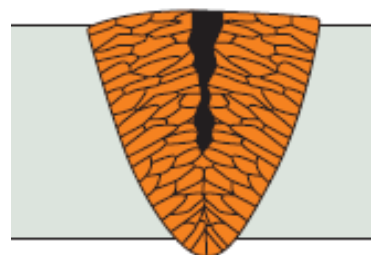
Pro zamezení vzniku trhlín za horka je podstatné:

- zaručit vysokou čistotu svarového kovu, zejména s ohledem na obsah síry, minimální obsah kyslíku ve svarovém kovu, obsah uhlíku pod peritektickým bodem tuhnutí primárního feritu,
- optimální geometrii svarových ploch,
- optimální parametry svařování.

Trhliny za studena jsou způsobeny účinkem difuzního vodíku jako trhliny indukované. Tvoří se ve strukturách citlivých na vodíkové zkřehnutí (v martenzitu a bainitu). Vodík se dostává do svarového kovu zejména prostřednictvím vlhkosti přídavného a základního materiálu. Proto je důraz kladen jednak na přípravu svarových ploch (jejich čistotu, ale i podmínky svařování), skladování přídavných materiálů a na hodnoty difuzního vodíku v přídavných materiálech. Cestou ke snížení rizika trhlín za horka je optimální předehřev a čistota svarových ploch.



Obr. 3.2 Trhlina za horka [16]



Obr. 3.3 Trhlina za horka z nedostatku svarového kovu [16]

Přídavné materiály pro jemnozrnné vysokopevnostní materiály se volí podle požadovaných vlastností svarového kovu a metody svařování. I když v současné době je k dispozici celá škála přídavných materiálů od řady renomovaných výrobců, pro potřeby svařování vysokopevných materiálů pro těžbu rud a uhlí je vhodné výběr optimalizovat. Výběr je nutný i z hlediska nutnosti ověřování svařovacích postupů a rozsahu jejich platnosti.

Přídavné materiály jsou většinou nabízeny v těchto kombinacích legur:

- Mn, MnNi, MnMo, MnNiMo, MnCrNiMo

Hlavní zásady technologických postupů svařování vysokopevnostních a ořevzdorných ocelí

Vysokopevnostní materiály mají nízký uhlíkový ekvivalent a proto je lze pomocí standardních metod snadno svařovat navzájem i ke všem obvyklým konstrukčním materiálům. Ocel s nízkým uhlíkovým ekvivalentem lze lépe svařovat než ocel s vysokou hodnotou uhlíkového ekvivalentu.

Uhlíkový ekvivalent lze stanovit pomocí vztahu (3.1), který stanovil mezinárodní svářečský institut:

$$C_e = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (3.1)$$

Tab. 3.2 Příklady uhlíkových ekvivalentů vysokopevnostních ocelí [6]

Typ oceli	Rozsah tloušťky [mm]	Uhlíkový ekvivalent C_e
S 355	5 - 100	0,39 - 0,43
WELDOX 355	8 - 25	0,34 - 0,37
WELDOX 420	6 - 80	0,37 - 0,39
WELDOX 460	6 - 80	0,37 - 0,42
WELDOX 500	8 - 80	0,37 - 0,42
WELDOX 700	4 - 130	0,39 - 0,64
WELDOX 900	4 - 80	0,56
WELDOX 960	4 - 50	0,56 - 0,64
WELDOX 1100	5 - 40	0,68 - 0,72
HARDOX 400	4 - 130	0,36 - 0,70
HARDOX 450	4 - 80	0,41 - 0,62
HARDOX 500	5 - 80	0,58 - 0,68
HARDOX 600	5 - 80	Cca 0,82

Je to pravděpodobně nejdůležitější technologický parametr otěruvzdorných ocelí, protože svarový spoj je téměř vždy potenciální zdroj trhlin (únavových nebo vodíkových). Čím méně je ocel legovaná a čím menší má obsah uhlíku, tím je lépe svařitelná a pravděpodobnost vzniku trhlin je nižší. Množství legur a obsah uhlíku je zohledněn právě v uhlíkovém ekvivalentu, příklady uhlíkových ekvivalentů vybraných ocelí jsou v tabulce 3.2.

Při svařování jemnozrnných, termomechanicky zpracovaných ocelí je cílem:

- Minimalizovat vnesené teplo (svařovat stanovenými parametry); doporučený maximální tepelné příkony se pohybují v rozmezí 5 až 15 (25) kJ/cm; dodržet maximální doporučené vnesené teplo = přizpůsobit parametry svařování (proud, napětí, rychlost svařování, případný předehřev a interpass).
- Udržet tvrdost tepelně ovlivněné oblasti (TOO).
- Dosáhnout vyhovující houževnatosti této oblasti.
- Postup svařování by měl probíhat takovým způsobem, abychom postupem svařování nevnikali do konstrukce nežádoucí pnutí, pokud je to možné, svařovat směrem k volným koncům a umožnit tak vznikajícímu pnutí „uniknout“ ze svarového spoje.
- Předehřev použít jen u větších tloušťek dle doporučení výrobce plechů.
- Dokonale připravit, vyčistit a vysušit svarové plechy; dbát na to, aby se v průběhu svařování nedostal do svarového spoje vodík z vlhkosti, odstranit (vysušením) kondenzovanou vlhkost, zbytky barev, mastnoty a další nečistoty ze svarových ploch.
- Použít přídatný materiál s nízkým obsahem vodíku.

Svarové spoje z jemnozrnných, termomechanicky zpracovaných je dobré zvolit spíše tupé svary než koutové. Dále minimalizovat pnutí při smršťování, zejména přesným umístěním svaru a vhodně naplánovat postup svařování. Při konstruování svarových spojů vycházet z průběhů namáhání konstrukce, zamezit nevhodné koncentraci svarů do namáhaných oblastí. Při konstrukci svarových uzlů vhodně volit potřebné svarové úkosy u tupých svarů.

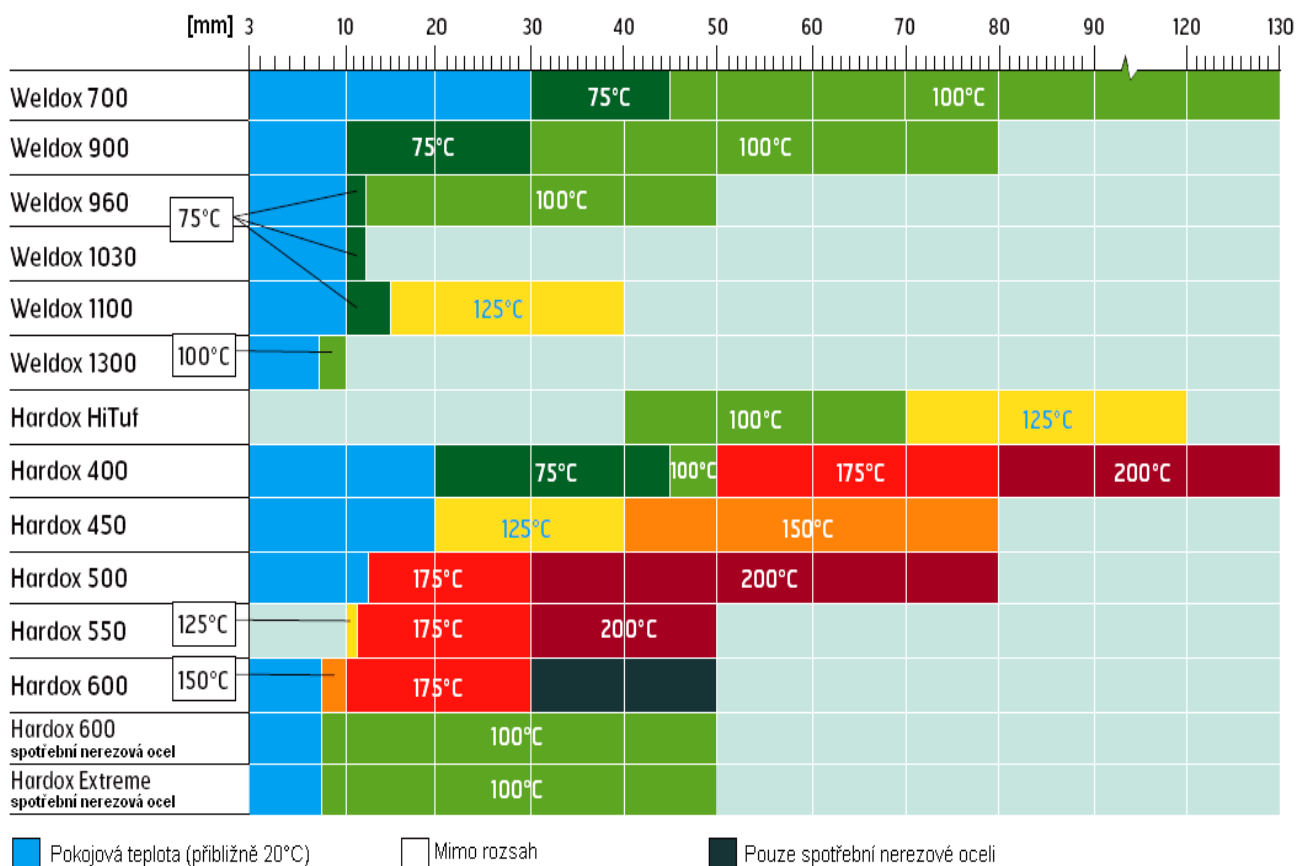
Především u materiálu HARDOX se klade důraz na návrh svarového spoje do oblastí, které jsou méně abrazivně namáhané. A umístit svar ve správném úhlu vzhledem ke směru toku abrazivního materiálu. Dále nepoužívat žíhání na snížení vnitřních pnutí po svařování, tyto oceli při žíhání nad 250 až 300 °C začínají ztrácet tvrdost, popouštějí se; pouze je možný dodatečný ohřev po svařování k usnadnění úniku vodíku z oceli; teplota po svaření se volí stejná jako teplota předehřevu.

Předehřev

Je mimořádně důležitý při stehování a při svařování kořenových svarů. Čím je teplota během svařování a po svařování vyšší, tím snáz unikne vodík z oceli. Nutnost provést předehřev se zvyšuje s tloušťkou materiálu (obr. 3.3) tak, aby se kompenzovalo rychlejší ochlazování tlustšího plechu a také proto, tlustší plech má vyšší hodnotu než tenký plech.

Pokud je okolní vlhkost vysoká nebo pokud je teplota nižší než +5°C, měla by se hodnota dle tabulky zvýšit o 25°C. Obdobně by se měla zvýšit teplota, pokud svařovaný výrobek je pevně vetknutý.

Jestliže se svařují různé typy oceli nebo pokud se ke svařování používají elektrody s vyšším uhlíkovým ekvivalentem než je ekvivalent základního materiálu, potřebný předehřev se stanoví podle oceli (nebo elektrody) s vyšším uhlíkovým ekvivalentem.



Obr. 3.3 Teploty předehřevu [16]

Když se okamžitě po svařování provede dodatečný ohřev svaru, také to usnadní únik vodíku z oceli. Teplota ohřevu po svařování by měla být stejná jako teplota přehřevu. Doba ohřevu by měla být minimálně 5 minut na milimetr tloušťky plechu, avšak celkem nejméně jedna hodina.

Dodatečné zpracování

Žíhání ke snížení pnutí se provádí za účelem snížení zbytkového pnutí po ukončení svařování. WELDOX lze za účelem snížení pnutí žíhat pouze v případě, že tento postup vyžadují konstrukční předpisy. HARDOX a WELDOX 1100 se za účelem snížení pnutí nesmí žíhat.

Přestože je problematika svařování těchto materiálů poměrně dostatečně zpracována a popsána, zůstává podstatným problémem praktická realizace poznatků a zásad při výrobě v reálně daných podmínkách (personálních možnostech a podmínkách vybavení výrobního podniku). Nároky na svařování a dodržení technologické kázně během svařování jsou u těchto ocelí přísnější než při použití běžných konstrukčních materiálů a je nutné důsledně dodržovat všechny zásady, aby konkrétní svarový spoj byl vyhovující.

4. ÚVOD DO EXPERIMENTU A JEHO PARAMETRY

4.1 NAVRŽENÉ A ZKOUŠENÉ TYPY OCELÍ DOMEX A HARDOX [6]

Pro experiment byly vybrány oceli DOMEX 550 a 700 (tloušťky 6 mm), což jsou konstrukční vysokopevnostní oceli s vynikající svařitelností, a HARDOX 400 (tloušťky 5 mm) a 550 (tloušťky 4 mm) otěruvzdorné plechy velmi odolné proti nárazu i při velmi nízkých teplotách.

DOMEX oceli se používají v aplikacích, jako jsou lodě, mosty, budovy, stroje, různé typy vozidel, zdvihací zařízení, nádrže a kontejnery. Pro splnění různých konstrukčních požadavků jsou oceli vyráběny se zaručenou mezí kluzu v rozmezí od 220 do 1200 Nmm⁻².

Díky vysoké pevnosti, může dojít ke snížení váhy objektů, což je obzvláště užitečné např. při výrobě koreb či kontejnerů.

Svařené vzorky materiálů se zkušebními svary jsou vyfocené na obr. 4.1 a obr. 4.2 a jejich chemické složení je uvedeno v tabulkách tab. 4.1, tab. 4.2.



Obr. 4.1 DOMEX 550



Obr. 4.1 Svařený vzorek DOMEX 700

DOMEX 550

Vlastnosti:

- $R_{p0,2} = 550 \text{ MPa}$
- $R_m = 600\text{-}760 \text{ MPa}$
- Rázová práce: $-20^\circ\text{C} = 40\text{J}$, $-40^\circ\text{C} = 27\text{J}$

Tab. 4.1 Max. obsah prvků (Nb + Ti + V max. 0,22%)

prvek	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti	V
obsah hm. %	0,12	0,1	1,8	0,025	0,01	0,015	0,09	0,15	0,15

DOMEX 700

Vlastnosti:

- $R_{p,0.2} = 700 \text{ MPa}$
- $R_m = 750\text{-}950 \text{ MPa}$
- Rázová práce: $-20^\circ\text{C} = 40\text{J}$, $-40^\circ\text{C} = 27\text{J}$

Tab. 4.2 Maximální obsah prvků (Nb + Ti + V max. 0.22%)

prvek	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti	V
obsah hm. %	0,12	0,1	2,1	0,025	0,01	0,015	0,09	0,15	0,20

Díky kombinaci vysoké tvrdosti, pevnosti a dobré houževnatosti představuje plech HARDOX optimální řešení pro situace kdy příčinou problémů obvykle bývá otěr. Vysoká odolnost proti opotřebení zvyšuje životnost komponentů například karosérií výklopných vozů, korečků rýpadel, drtičů, skluzů, vibračních podavačů, koreb a jiných nástaveb nákladních automobilů, sít pro třídiče, dílů pro betonárky, cementárny, mlýny a další.

Tvrdost plechu se dosazuje účinným kalením ve vodě na kalicí lince. Díky tomu má plech vysokou tvrdost i přes to, že v oceli je málo legujících prvků. Výsledkem je plech, který se snadno zpracovává, ohýbá a svařuje.

Fotky svařených materiálových vzorků, i zkušební svary, jsou na obr. 4.3 a obr. 4.4 a jejich chemické složení je uvedeno v tabulkách tab. 4.3, tab. 4.4.



Obr. 4.3 Svařený vzorek HARDOX



Obr. 4.4 HARDOX 550

HARDOX 400

Vlastnosti:

- $R_{p,02} = 1000 \text{ MPa}$
- $R_m = 1250 \text{ MPa}$
- Rázová práce: $-40^\circ\text{C} = 45\text{J}$

Tab. 4.3 Maximální obsah prvků pro plechy o tloušťce 3-10 mm

prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
obsah hm. %	0,14	0,50	1,30	0,020	0,010	1,40	1,40	0,60	0,004

HARDOX 550

Vlastnosti:

- $R_{p,02} = 1400 \text{ MPa}$
- $R_m = 1700 \text{ MPa}$
- Rázová práce: $-40^\circ\text{C} = 30\text{J}$

Tab. 4.4 Maximální obsah prvků

prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
obsah hm. %	0,37	0,7	1,6	0,025	0,01	0,3	0,25	0,25	0,004

4.2 PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ [5], [6], [13], [14]

Experiment byl z části proveden u firmy Fronius Praha s použitím svařovacího zařízení TRANSTIG 4000 + Plasmamodule 10 s mechanizovaným pojezdem na obr. 4.7 a obr. 4.8 a schéma možného zapojení na obr. 4.6. Kde byly svařovány vzorky materiálů DOMEX 550, DOMEX 700 a HARDOX 400. Pro poslední vzorek HARDOX 550 bylo použito zařízení firmy Castolin S.A. typu EUTRONIC GAP 3000 na obr. 4.9 až obr. 4.12.

V rámci experimentu jsme obešli problém s přídatnými materiály a svařili jsme čtyři reprezentativní oceli bez přídatného materiálu plazmovým key hole svařováním (svařováním klíčovou dírkou obr. 4.5.).

Teplo a dynamický účinek oblouku vytvářejí otvor na přední straně tavné lázně. Otvor, kde oblouk přechází přes materiál, se nazývá klíčová díрка. Při posuvu plazmového hořáku ve směru svařování dochází vlivem povrchového napětí k opětovnému spojení svarového kovu za klíčovou dírkou. Umožňuje to svařování tupých svarů do tloušťky 8 mm bez úpravy svarového úkosu a na jeden průchod a snadnou kontrolu svaru.

Parametry byly odladěné na zkušebních svarech tak (krátké svary na obr. 4.1, obr. 4.2, obr. 4.3 a obr. 4.4), aby bylo spolehlivé protavení kořene svaru pomocí klíčové dírkou.



Obr. 4.5 Detail klíčové dírky ve svaru

4.2.1 PARAMETRY PRO OCELI DOMEX 550, DOMEX 700 A HARDOX 400

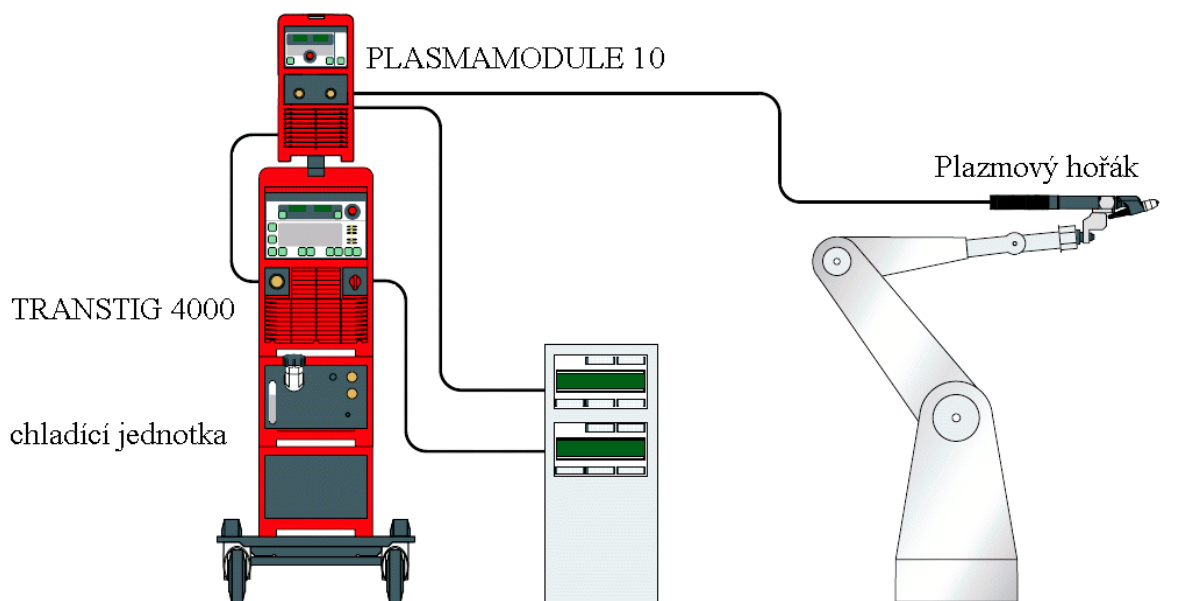
Svařovací zařízení TRANSTIG 4000

Zařízení je svařovací zdroj WIG DC o výkonu 400 A. Je extrémně jednoduché, s praktickým intuitivním ovládáním, maximálně robustní, výkonné, plně digitalizované a je mnohostranně použitelné.

- Automatický dofuk plynu (v závislosti na svařovacím proudu), ideální čas dofuku je automaticky vypočítáván tak, aby nedocházelo k oxidaci elektrody a tavné lázně
- Bezdotykové zapalování pro perfektní zapálení oblouku impulzem vysokého napětí, i s velmi dlouhou hadicovou soupravou
- Dotykové zapalování pro zapálení bez impulsu vysokého napětí v náročných oblastech použití
- Možnost použití s generátorem pro mobilní použití.

Plasmamodule 10 s mechanizovaným pojezdem

Tento nástavec pro digitální regulaci plynu a řízení pilotního oblouku pracuje na modulární bázi s digitálním zdrojem energie firmy Fronius, a je klíčem k získání velmi vysoké rychlosti svařování, bezroztříkové svařování a minimální zkreslení svařence. Pro ruční, mechanizované nebo automatizované využití.



Obr. 4.6 Příklad schématu zapojení komponentů svařovacího zařízení [5]

Parametry svařování oceli DOMEX 550 a 700 tloušťky 6 mm

- proud $I = 220 \text{ A}$,
- napětí $U = 23,3 \text{ V}$,
- rychlost svařování $v_s = 200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- vnesené teplo $Q_s = 1,090 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
- průtok plazmového plynu $\text{Ar} = 3,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
- průtok ochranného plynu $\text{Ar} = 15,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
- průměr dýzy $4,0 \text{ mm}$

Parametry svařování oceli HARDOX 400 tloušťky 5 mm

- Proud $I = 205 \text{ A}$
- napětí $U = 23,0 \text{ V}$
- rychlost svařování $v_s = 200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- vnesené teplo $Q_s = 0,928 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
- průtok plazmového plynu $\text{Ar} = 3,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
- průtok ochranného plynu $\text{Ar} = 15,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
- průměr dýzy $4,0 \text{ mm}$



Obr. 4.7 Svařovací zařízení TRANSTIG 4000 + Plasmamodul 10



Obr. 4.8 Průběh svařování plazmovým hořákem

4.2.2 PARAMETRY PRO OCEL HARDOX 550

EUTRONIC GAP 3000

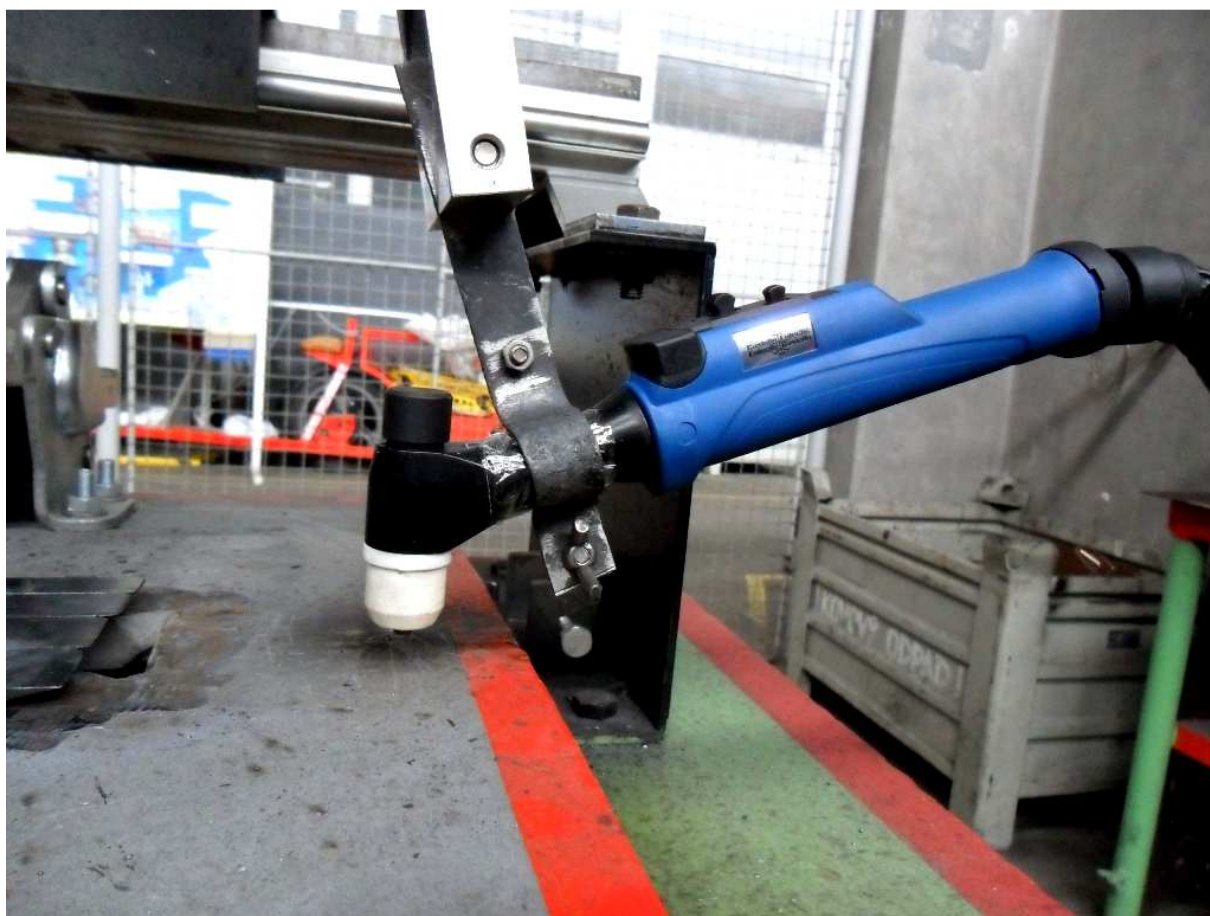
Zařízení je vhodné pro svařování plazmovým paprskem key-hole, pro navařování plazmou práškem, pro svařování plazmovým paprskem studeným drátem, TIG svařováním, nebo TIG svařováním studeným drátem. Zařízení je vybaveno čtyřmi průtokoměry všech procesních plynů, analog/digitálním připojením na robota a dalším. Použitý plazmový i ochranný plyn Ar + 7,5% H₂ a hořák ABIPLAS WELD 100W (MT) firmy Alexander Binzel (kapalinou chlazený).



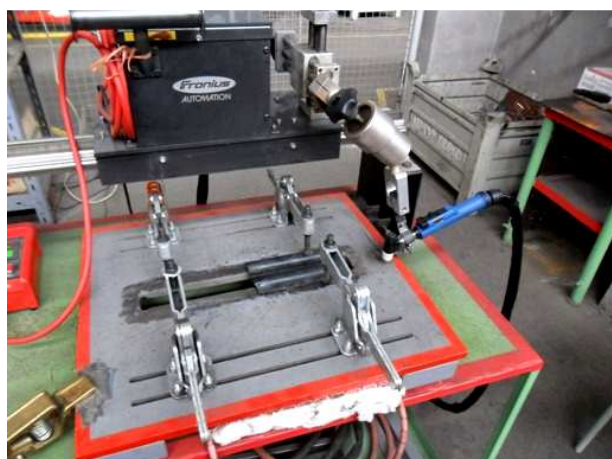
Obr. 4.9 Svařovací zařízení EUROTRONIC GAP 3000

Parametry svařování oceli HARDOX 550 tloušťky 4mm

- Proud $I = 48,5 \text{ A}$
- napětí $U = 34 \text{ V}$
- rychlost svařování $v_s = 60 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- vnesené teplo $Q_s = 1,154 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
- průtok plazmového plynu Ar $= 1,34 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
- průtok ochranného plynu Ar $11,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
- průměr dýzy $0,8 \text{ mm}$



Obr. 4.10 Plazmový hořák



Obr. 4.11 Svařovací pracoviště



Obr. 4.12 Průběh svařování a parametry

4.3 PARAMETRY ŘEZÁNÍ VZORKŮ

Svařené plechy byly řezány na jednotlivé vzorky vzduchovou plazmou firmy ESAB typ LPH 50 (Obr. 4.13). Z důvodu rekonstrukce kompresorové stanice na VUT FSI v Brně jsme jako zdroj tlakového vzduchu použili mobilní kompresor s tlakovou nádobou Orlík 21SK-75.

Přestože byl tlakový vzduch na výstupu z tlakové nádoby čištěný od oleje a kondenzované vody projevilo se výrazně zkrácené životnosti elektrod. Elektrody a hlavně trysky měly životnost jen cca 1,5 až 2,5m řezu na tloušťce oceli 6 mm. Běžná životnost elektrody a trysky byla při dodávce tlakové vzduchu z rozvodu několik desítek metrů. Příčinou nízké životnosti bylo pravděpodobně znečištění a nižší tlak vzduchu.

Parametry řezání :

- Proud $I = 50 \text{ A}$
- rychlost řezání $v_f = 300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
- tlak vzduchu $p_v = 5,5 \text{ bar}$



Obr. 4.13 Vzduchová plazma
ESAB typ LPH 50



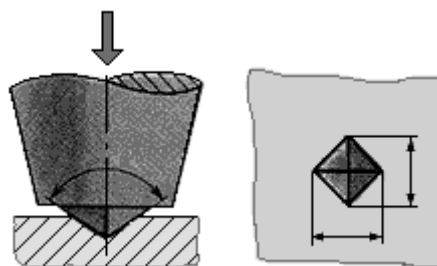
Obr. 4.14 Řezací hlava

5. PROVEDENÍ ZKOUŠEK A MĚŘENÍ

Po rozřezání vzorků byla měřena pevnost svarových spojů příčnou zkouškou tahem (výsledky zkoušek jsou uvedeny v tab. 5.3, tab. 5.4, tab. 5.5 a tab. 5.6), tvrdost svarového spoje a tvrdost na řezné hraně metodou dle Vickerse, a zkouška ohybem.

5.1 ZKOUŠKY TVRDOSTI DLE VICKERSE [2]

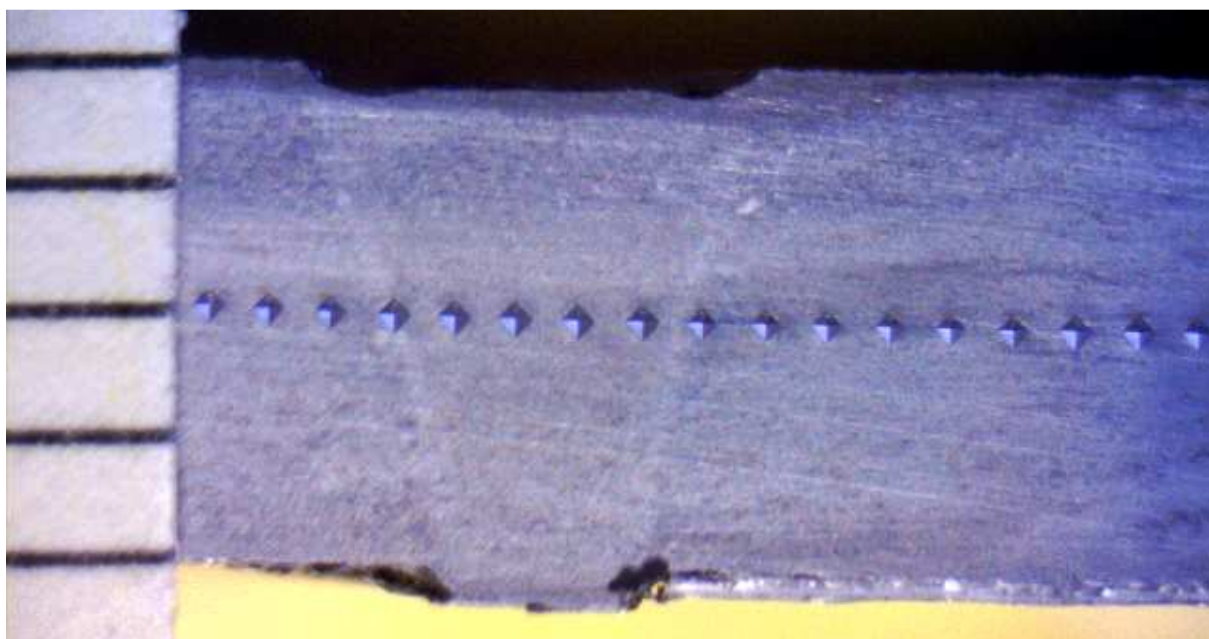
Do materiálu se pod zatížením 10kg vtlačuje diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o daném vrcholovém úhlu 136° mezi protilehlými stěnami po danou dobu (obr. 5.1). Po odlehčení se změří úhlopříčky vtisku. Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku. Způsob provedení zkoušky se řídí normou ČSN EN ISO 6507/1, kde je popsán i celý průběh zkoušky. Měření bylo provedeno na tvrdoměru ZWICK 3212 s CCD kamerou.



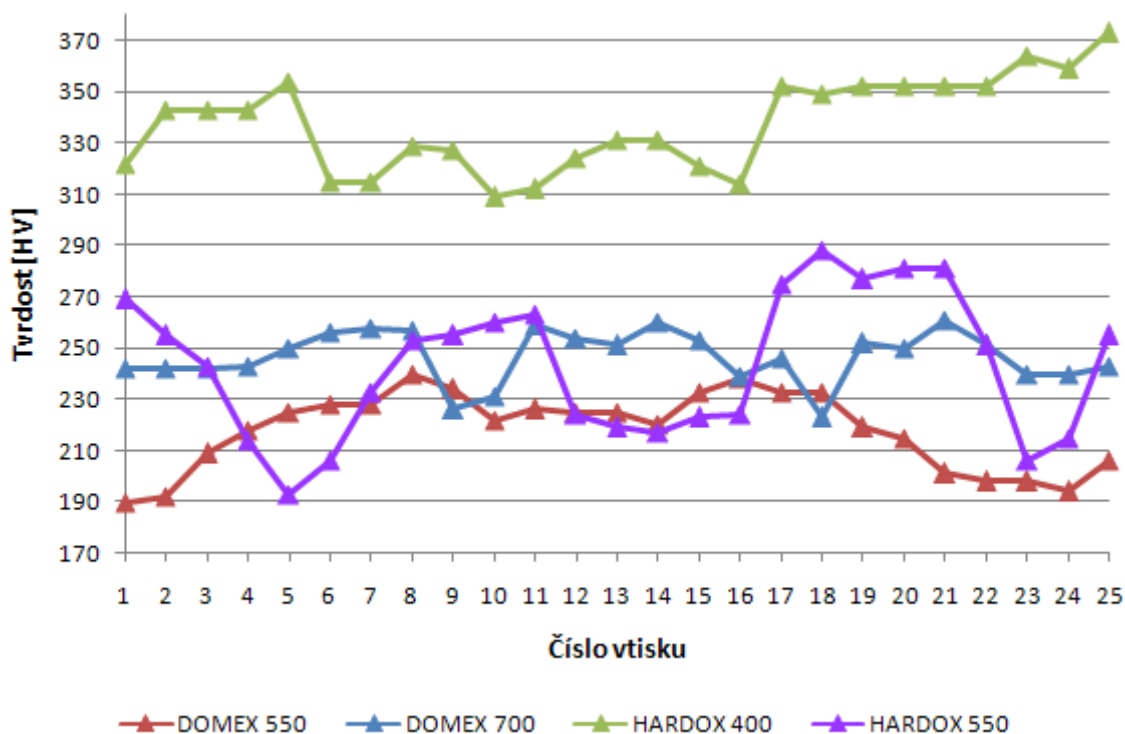
Obr. 5.1 Schéma měření tvrdosti podle Vickerse [2]

5.1.1 TVRDOST SVAROVÉHO SPOJE

Tvrdost byla měřena v celém průřezu svaru od základního materiálu, přes tepelně ovlivněné oblasti a svarový kov (ZM-TOO-SK-TOO-ZM na obr. 5.2). Hodnoty měření tvrdosti jsou v tab. 5.1 a jednotlivé průběhy tvrdostí vidíme na obr. 5.3. Na každém vzorku se provedlo 25 měření, aby bylo zajištěno odhalení problémových oblastí s rozdílnou tvrdostí v důsledku procesu svařování. Jednotlivé vtisky jsou od sebe vzdáleny 0.5 mm.



Obr. 5.2 Řada vtisků na svařovaném vzorku HARDOX 550



Obr. 5.3 Průběhy měření tvrdostí přes svar

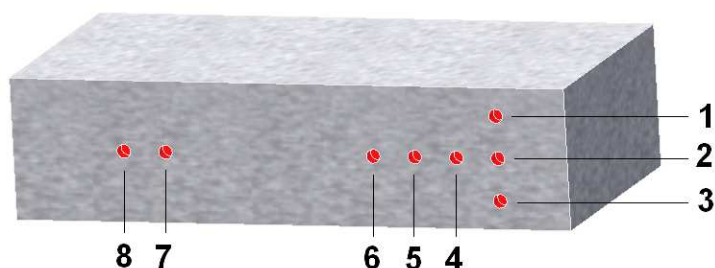
Tab. 5.1 Naměřené hodnoty při zkoušce tvrdosti svarového spoje

Číslo vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Tvrdost [HV] DOMEX 550	190	192	209	218	225	228	228	240	234	222	226	225	225
Tvrdost [HV] DOMEX700	242	242	242	243	250	256	258	257	226	231	259	254	251
Tvrdost [HV] HARDOX 400	322	343	343	343	354	315	315	329	327	309	312	324	331
Tvrdost [HV] HARDOX 550	269	255	243	214	193	206	233	253	255	260	263	224	219
Číslo vtisku	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Tvrdost [HV] DOMEX 550	220	233	238	233	233	219	215	201	198	198	194	206	
Tvrdost [HV] DOMEX700	260	253	239	246	223	252	250	261	251	240	240	243	
Tvrdost [HV] HARDOX 400	331	321	314	352	349	352	352	352	352	364	359	373	
Tvrdost [HV] HARDOX 550	217	223	224	275	288	277	281	281	251	206	215	255	

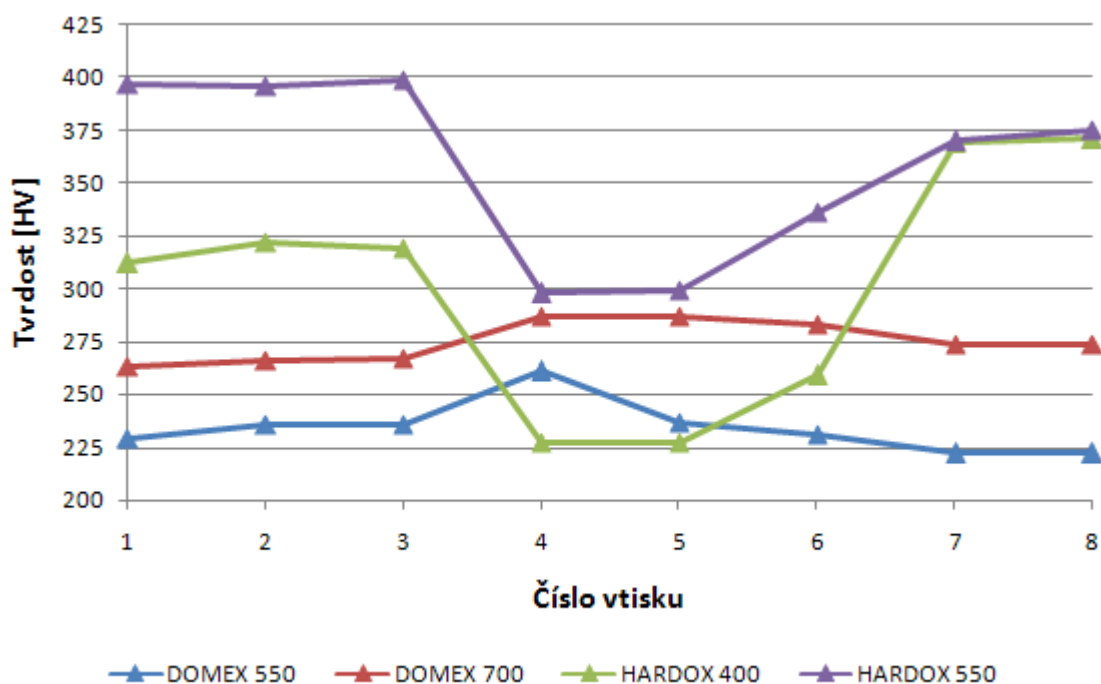
Na průběhu tvrdosti v závislosti na poloze vtisku lze sledovat mírné zvýšení tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti u oceli DOMEX 550 což přispívá k zvýšení pevnosti spoje. U oceli DOMEX 700 se již projevil pokles tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti o cca 25HV. Ocel HARDOX 400 nedosáhla předpokládaných tvrdostí (420HV) a v oblasti svaru se projevil pokles tvrdosti o cca 30 až 40HV. U čtvrté oceli HARDOX550 bylo použito jiných

svařovacích parametrů, s předpokladem minimalizace tepelného ovlivnění. Vzhledem k nízké rychlosti svařování (60mm/min) se však vliv tepla projevil na značně široké oblasti. To vedlo k výraznému poklesu tvrdosti. U všech ocelí značí pokles tvrdosti i pokles pevnostních charakteristik.

5.1.2 TVRDOST NA ŘEZNÉ HRANĚ



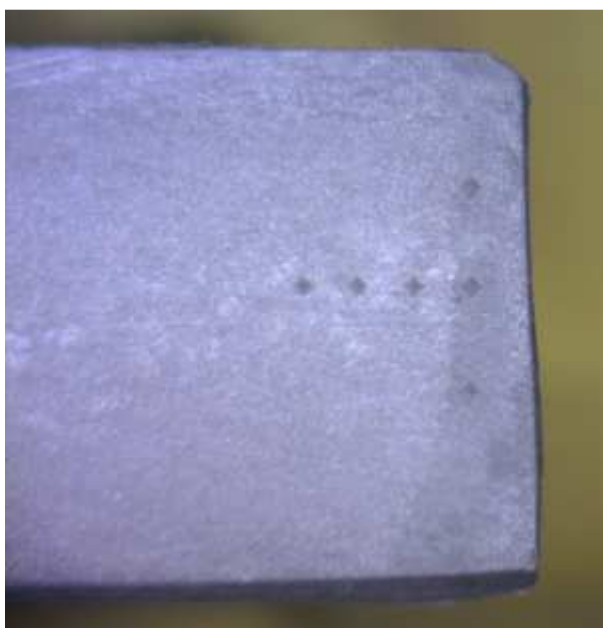
Obr. 5.4 Umístění vtisků při měření tvrdosti



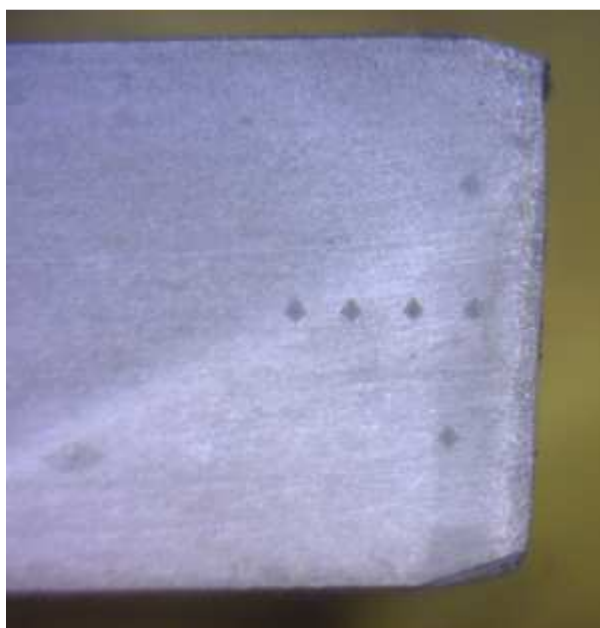
Obr. 5.5 Průběhy měření tvrdostí na řezné hraně

Tab. 5.2 Naměřené hodnoty při zkoušce tvrdosti na řezné hraně

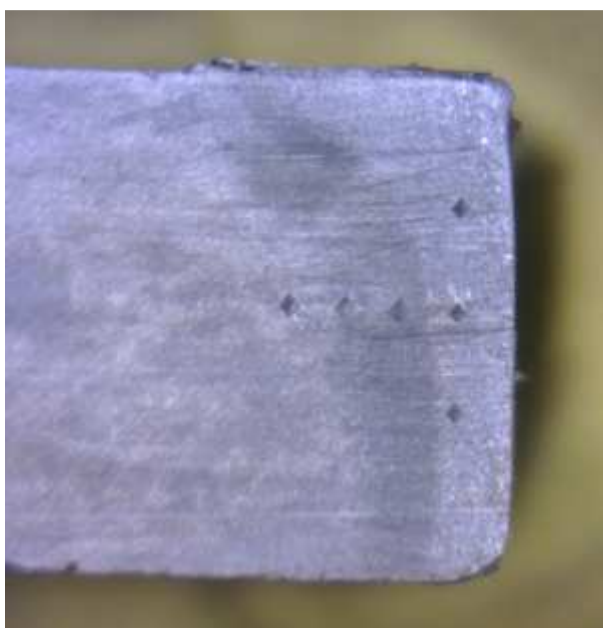
Číslo vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8
Tvrdost [HV] DOMEX 550	229	236	236	261	237	231	222	222
Tvrdost [HV] DOMEX700	263	266	267	287	287	283	274	274
Tvrdost [HV] HARDOX 400	312	322	319	227	227	259	369	371
Tvrdost [HV] HARDOX 550	397	396	399	298	299	336	370	375



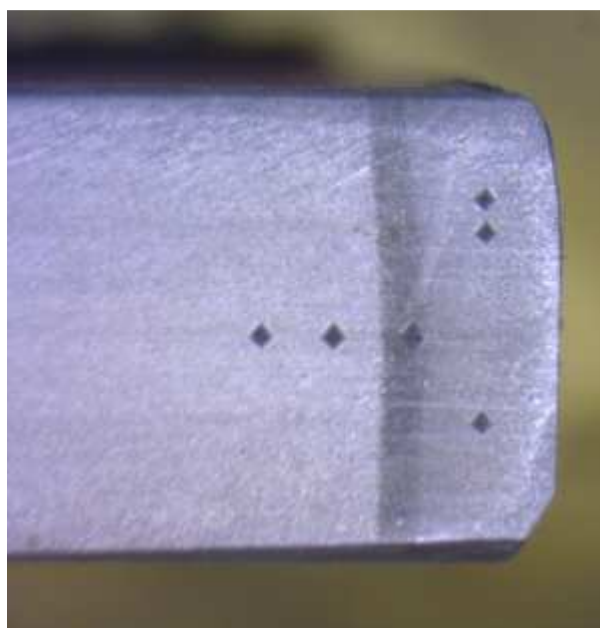
Obr. 5.6 Detail vtisků na materiálu
DOMEX 550



Obr. 5.7 Detail vtisků na materiálu
DOMEX 700



Obr. 5.8 Detail vtisků na materiálu HARDOX
400



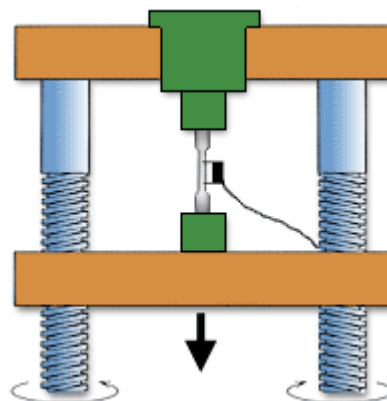
Obr. 5.9 Detail vtisků na materiálu HARDOX
550

U vysokopevnostních ocelí se doporučuje řezání plazmou nebo laserem. V rámci této práce se vzorky připravovaly řezáním vzduchovou plazmou pro zkoušku tahem a ohybem. Při této příležitosti se ověřila tvrdost na hraně řezu. Tepelný účinek plazmového řezání vede k metalurgickým změnám v teplem ovlivněné oblasti a u vysokopevnostních ocelí budou mít důležitou roli. Pro svařování však průběh tvrdosti neznamená žádné omezení, protože se následným svarem tenká řezná oblast přetaví.

5.2 PŘÍČNÁ ZKOUŠKA TAHEM [3], [21]

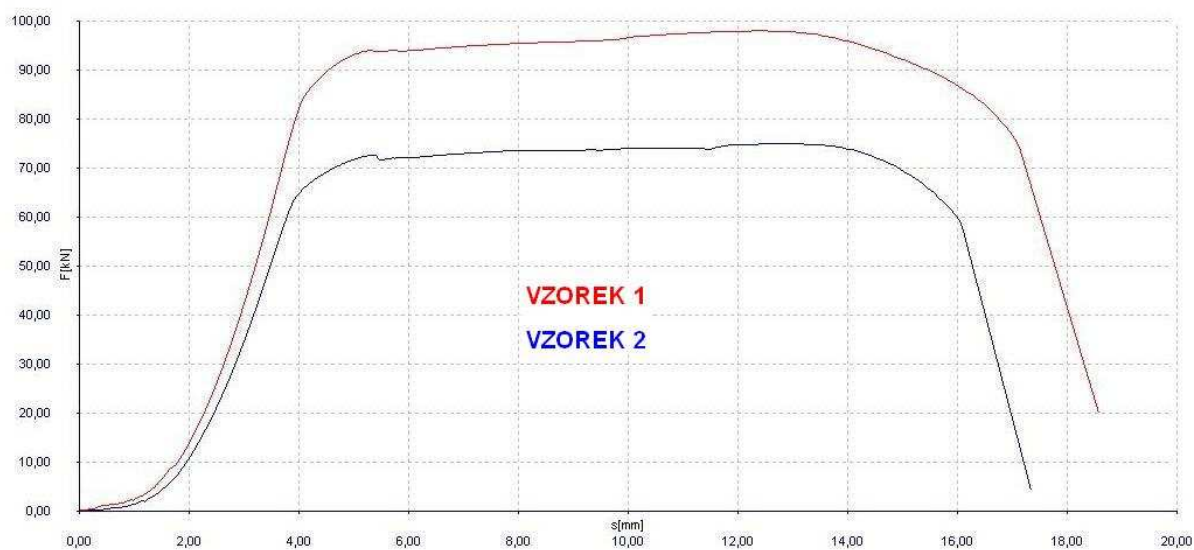
Zkouškou zjišťujeme hodnoty, které jsou nezbytně nutné pro další pevnostní výpočty strojů a konstrukcí a k ověření hodnot mechanických vlastností materiálů. Tato zkouška patří k nejpoužívanějším v technické praxi.

Při zkoušce sledujeme chování materiálu za působení klidných, plynule a spojitě se měnících sil, bez rázů, při současném zjišťování závislosti mezi působící silou a deformací zkušební tyče (vzorku). Zatěžování zkušebního tělesa pokračuje plynule až do jeho přetržení. Zkouška byla provedena na stroji ZD 40 (400 kN). Dále jsou data zpracována počítačem s programem M – TEST verze 1.7 vhodný pro zkoušení kovových materiálů podle normy EN 10001 – 2.



Obr. 5.10 Schéma příčné zkoušky tahem [21]

DOMEX 550

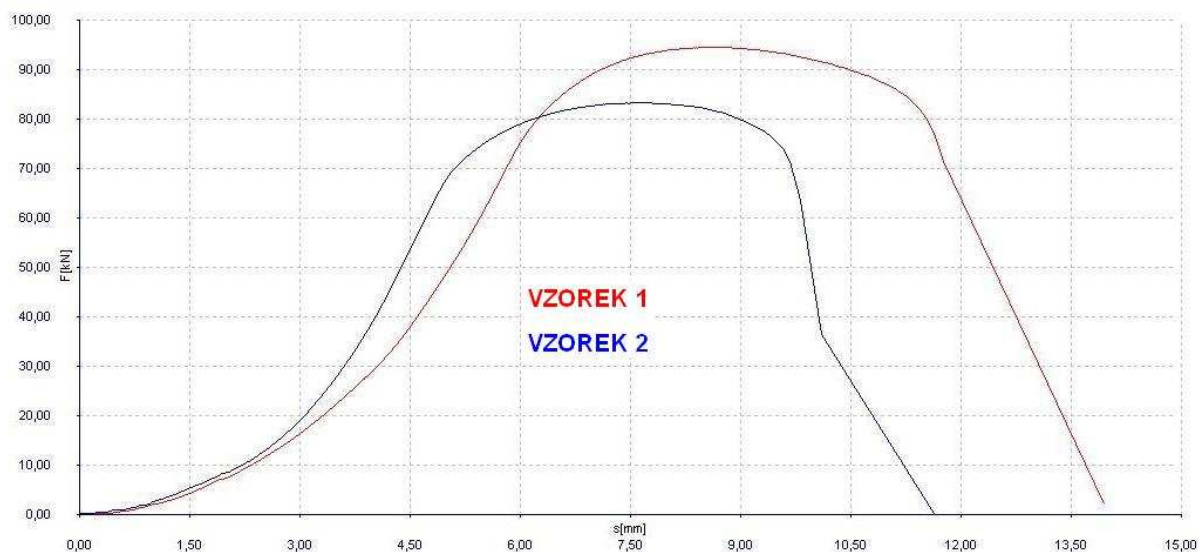


Obr. 5.11 Průběh zkoušky tahem DOMEX 550

Tab. 5.3 Naměřené hodnoty DOMEX 550

vzorek.	a [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	V _t [mm/min]
1	6,1	24,43	149,023	98010,8	612,2518	657,6891	12,5	2,352286
2	6,1	18,6	113,46	74942,4	610,6187	660,5182	11,25	2,197413

DOMEX 700

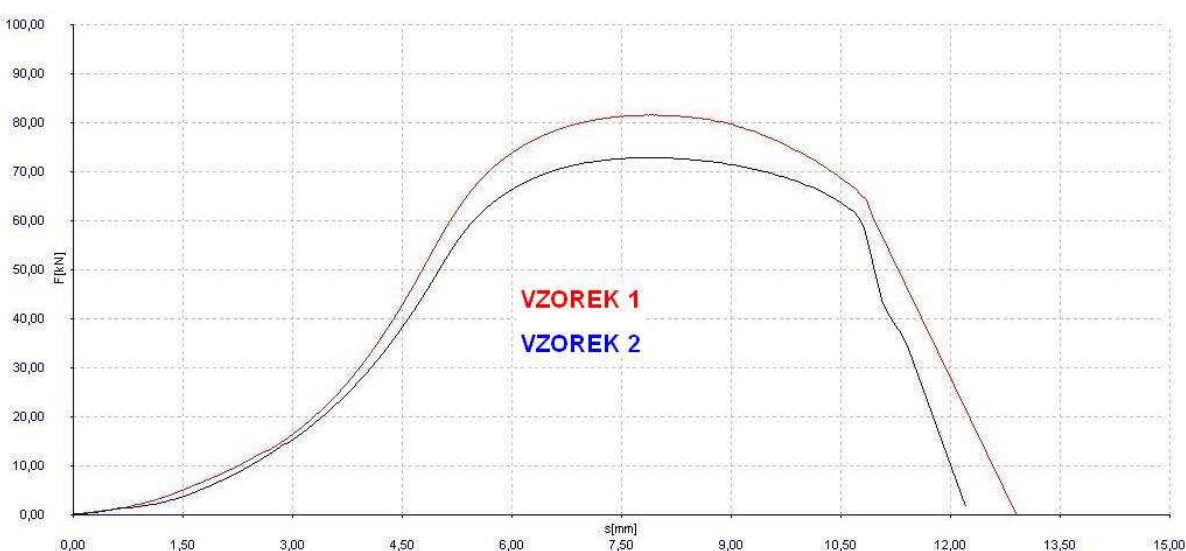


Obr. 5.12 Průběh zkoušky tahem DOMEX 700

Tab. 5.4 Naměřené hodnoty DOMEX 700

vzorek.	a [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	V _t [mm/min]
1	6	21	126	94502,8	708,527	750,0222	7,5	2,987099
2	6	18,65	111,9	83283,6	695,9464	744,2682	7,5	2,509001

HARDOX 400

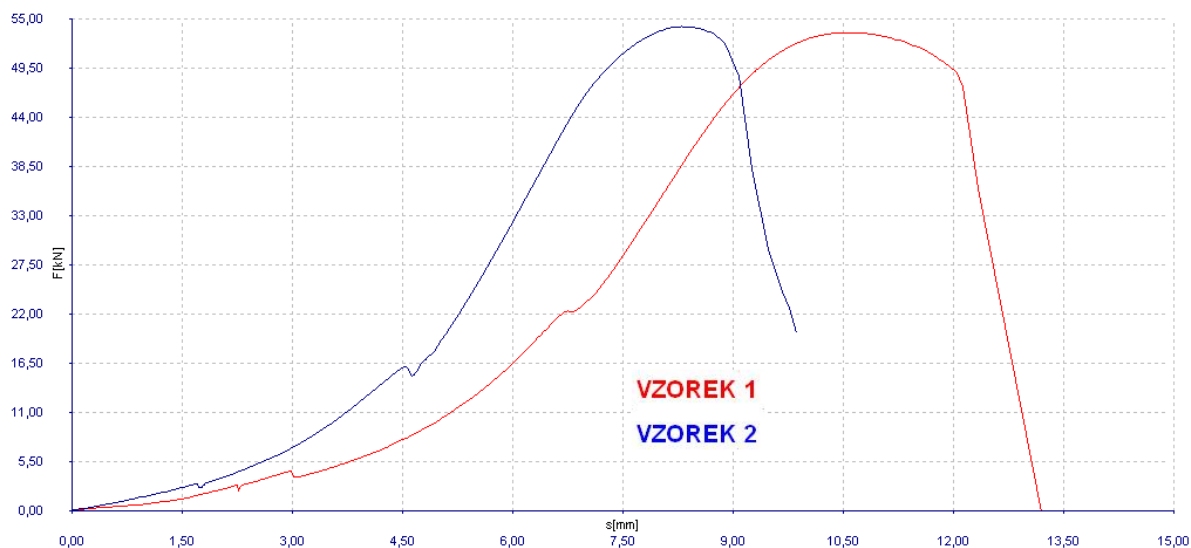


Obr. 5.13 Průběh zkoušky tahem HARDOX 400

Tab. 5.5 Naměřené hodnoty HARDOX 400

vzorek.	a [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	V _t [mm/min]
1	5,5	20,2	111,1	81591,2	688,684	734,3943	7,5	2,798829
2	5,5	18,22	100,21	72864	681,6924	727,1131	7,5	2,703712

HARDOX 550



Obr. 5.14 Průběh zkoušky tahem HARDOX 550

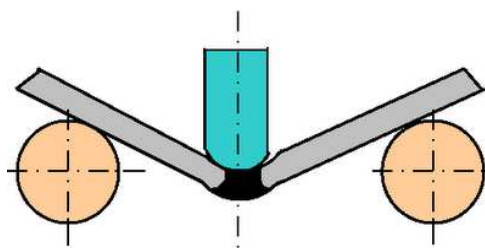
Tab. 5.6 Naměřené hodnoty HARDOX 400

vzorek.	a [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	V_t [mm/min]
1	4,0	17,5	70,00	53485,60	691,79	715,05	3,75	3,30
2	4,0	18,70	70,40	54172,00	706,62	724,22	2,50	3,04

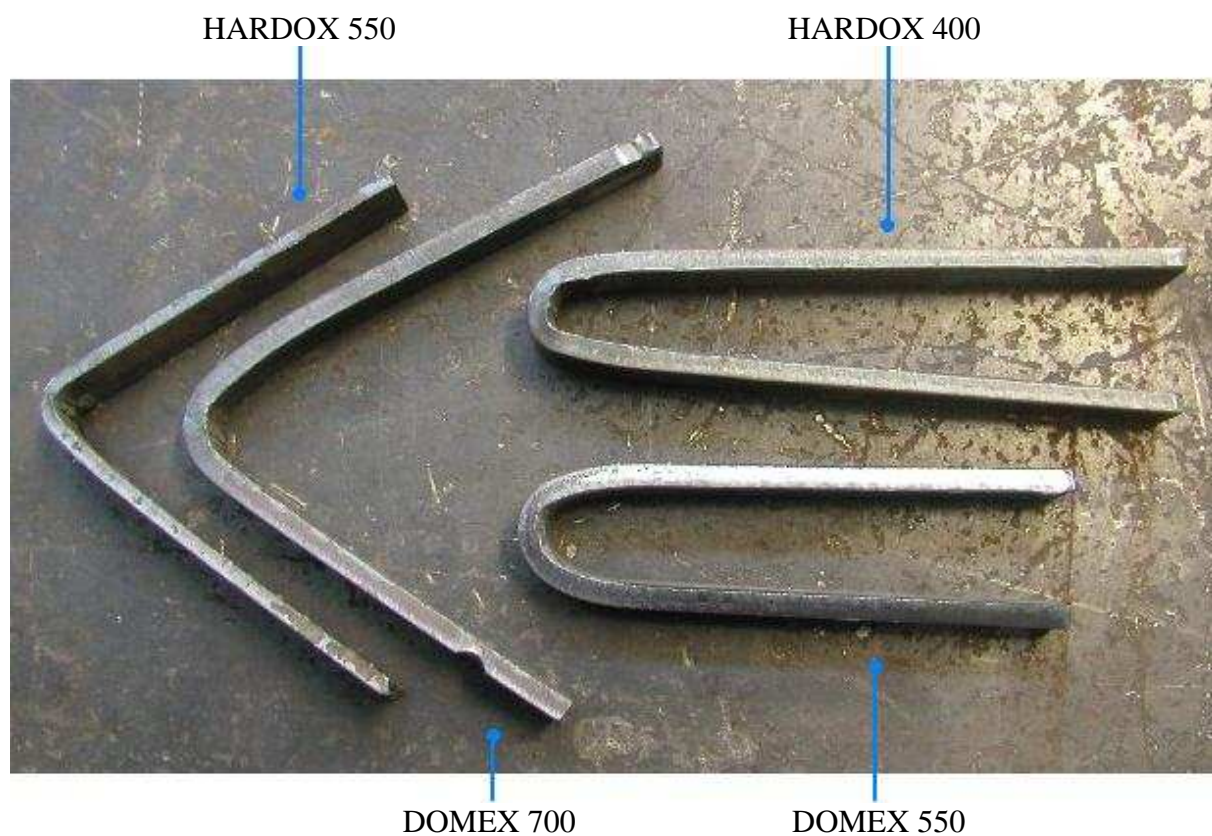
5.3 ZKOUŠKA LÁMAVOSTI OHYBEM [9], [19]

Zkouška lámavosti se většinou používá pro zkoušení deformační schopnosti tupých svarových spojů za studena.

Princip spočívá v ohnutí ploché tyče, se svarem uprostřed, okolo trnu až do porušení celistvosti svaru trhlinami. Výsledek zkoušky závisí na dosaženém úhlu ohnutí, při dosažení úhlu 180° bez porušení se považuje za plně vyhovující svar. Tato zkouška se řídí normou ČSN EN ISO 910.



Obr. 5.15 Schéma zkoušky lámavosti svaru [19]



Obr. 5.16 Naohýbaná sada vzorků

Tab. 5.7 Naměřené hodnoty při zkoušce lámavosti

	číslo vzorku	šířka vzorku [mm]	úhel ohybu
DOMEX 550 tloušťka 6 mm	1	20	180°
	2	20	180°
DOMEX 700 tloušťka 6 mm	1	20	120°
	2	20	102°
HARDOX 400 tloušťka 5 mm	1	20	180°
	2	20	180°
HARDOX 550 tloušťka 4 mm	1	20	106°
	2	20	108°

Makrostruktury svarů po ohybu:

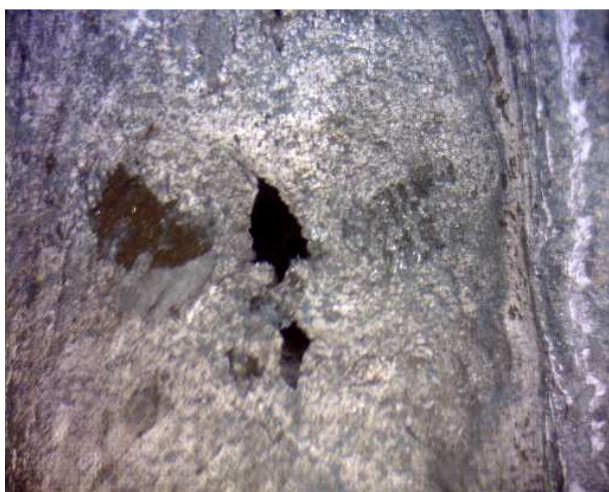


Obr. 5.17 Detail ohybu vzorku DOMEX 550



Obr. 5.18 Detail ohybu vzorku DOMEX 550

Na povrchu svaru se objevují mikrotrhliny na obr. 5.17, na druhém obr. 5.18 je vidět větší mikrotrhlina v ose svaru.



Obr. 5.19 Detail ohybu vzorku DOMEX 700



Obr. 5.20 Detail ohybu vzorku DOMEX 700

Na obr. 5.19 je vidět hlubší trhlina v ose svaru při menším úhlu ohybu než byl u materiálu DOMEX 550. Dále se na obr. 5.20 vytvořily mikrotrhliny na rozhraní svaru a základního materiálu.



Obr. 5.21 Detail ohybu vzorku HARDOX 400



Obr. 5.22 Detail ohybu vzorku HARDOX 400

U materiálu HARDOX 400 se při maximálním ohybu 180° objevily pouze mikrotrhliny v ose svaru na obr. 5.21 a na rozhraní svaru a základního materiálu na obr. 5.22.



Obr. 5.23 Detail ohybu vzorku HARDOX 550



Obr. 5.24 Detail ohybu vzorku HARDOX 550

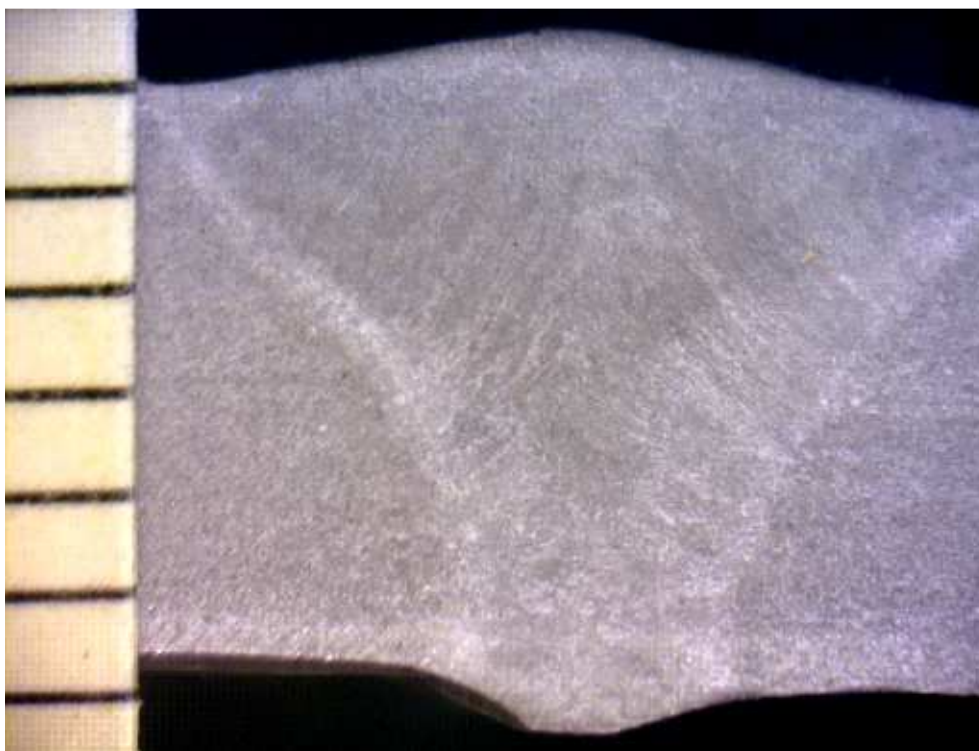
Materiál HARDOX 550 dovolil nejmenší ohyb při vytvoření mikrotrhlin na povrchu obr. 5.23 a na rozhraní obr. 5.24.

5.4 METALOGRAFICKÁ ZKOUŠKA [22]

Používá se jako doplnění ostatních mechanických zkoušek vlastností materiálů, zejména při ověřování stavu materiálu a svarových spojů. Metalografickou zkoušku můžeme rozdělit podle zvětšení na makrostrukturní a mikrostrukturní. Vybraný vzorek je potřeba vhodně připravit broušením, leštěním a vhodným naleptáním. Výsledky zkoušek se většinou dokládají fotodokumentací, jak je vidět na obr. 5.25 až obr. 5.35.

Mikrostruktury byly pořízeny pomocí optického mikroskopu NEOPHOT 32 a makrostruktury na stereo mikroskopu SCHUT SSM-E.

5.4.1 MAKROSTRUKTURNÍ ANALÝZA SVARU

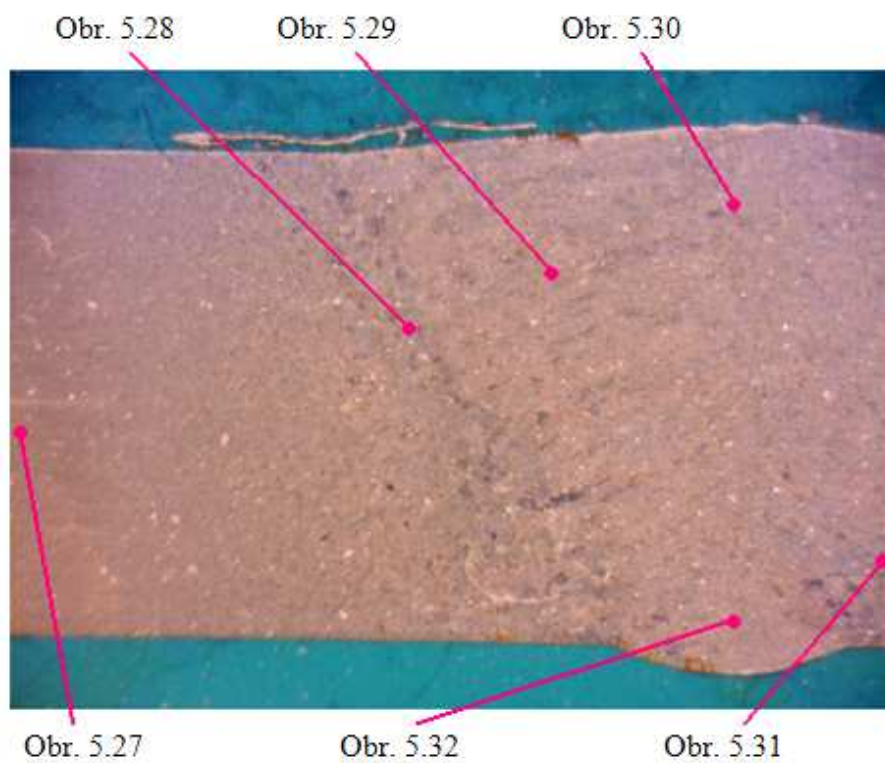


Obr. 5.25 Makrostruktura svarového spoje

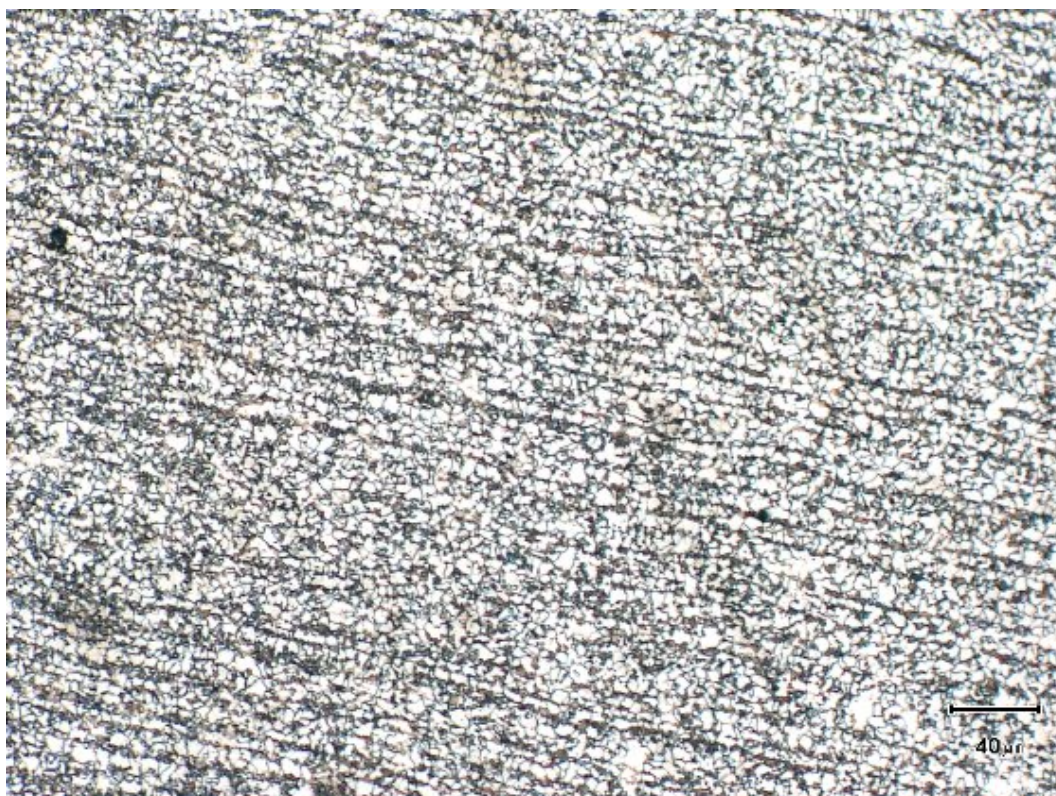
Na obr. 5.21 je makrostruktura dobře viditelného tvaru svarového spoje se správným tvarem kořene s malou tepelně ovlivněnou oblastí. Ve svarovém kovu jsou viditelné dendrity vycházející z rozhraní tuhé fáze a tavenina a jsou kolmé na toto rozhraní. Spoj je čistý bez jakýchkoli pórů, bublin, či jiných vad.

5.4.2 MIKROSTRUKTURNÍ ANALÝZA SVARU

Místa odkud byly pořízeny mikrostruktury jsou vidět na obr. 5.26, vzorek byl naleptán 2 % nitemem.



Obr. 5.26 Znázornění umístění mikrostruktur na vzorku



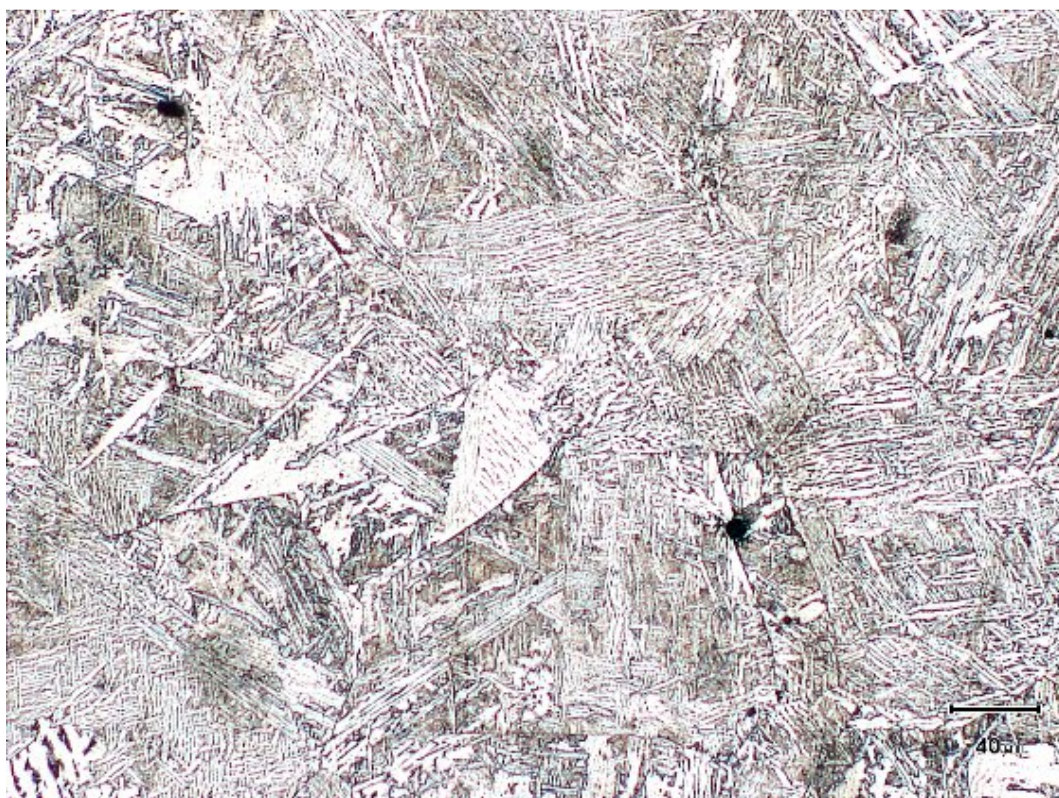
Obr. 5.27 Mikrostruktura základního materiálu



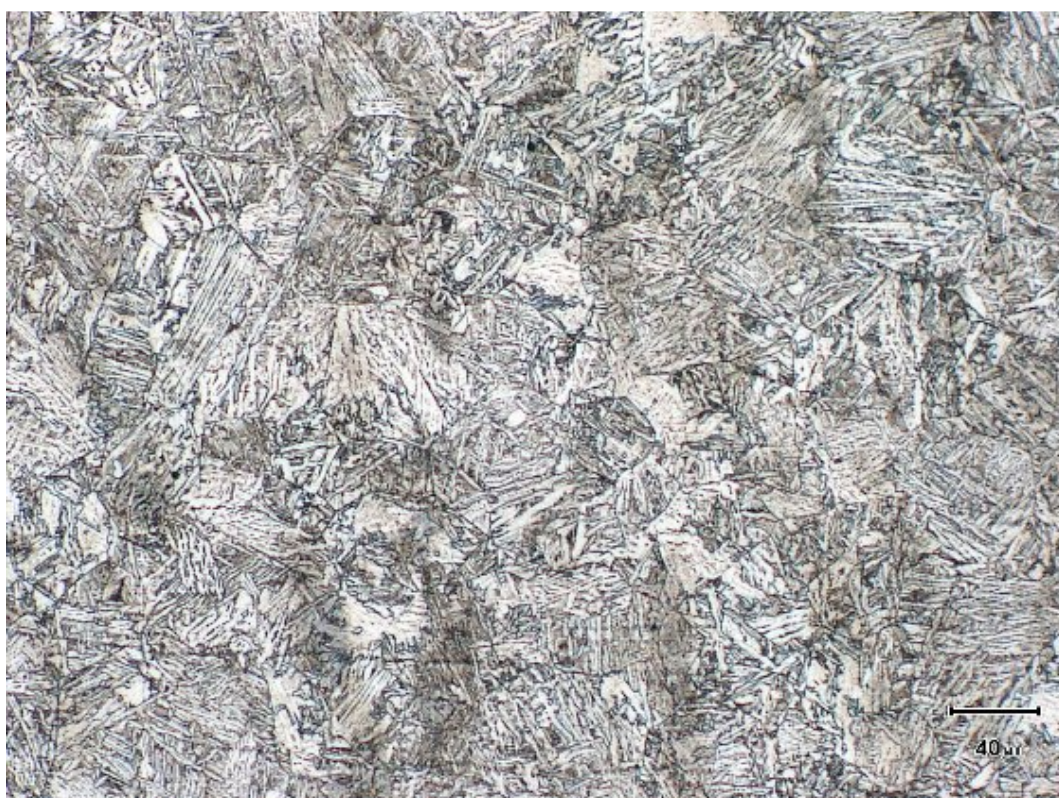
Obr. 5.28 Mikrostruktura přechodu základního materiálu do tepelně ovlivněné oblasti



Obr. 5.29 Mikrostruktura přechodu tepelně ovlivněné oblasti do svarového kovu



Obr. 5.30 Mikrostruktura svaru



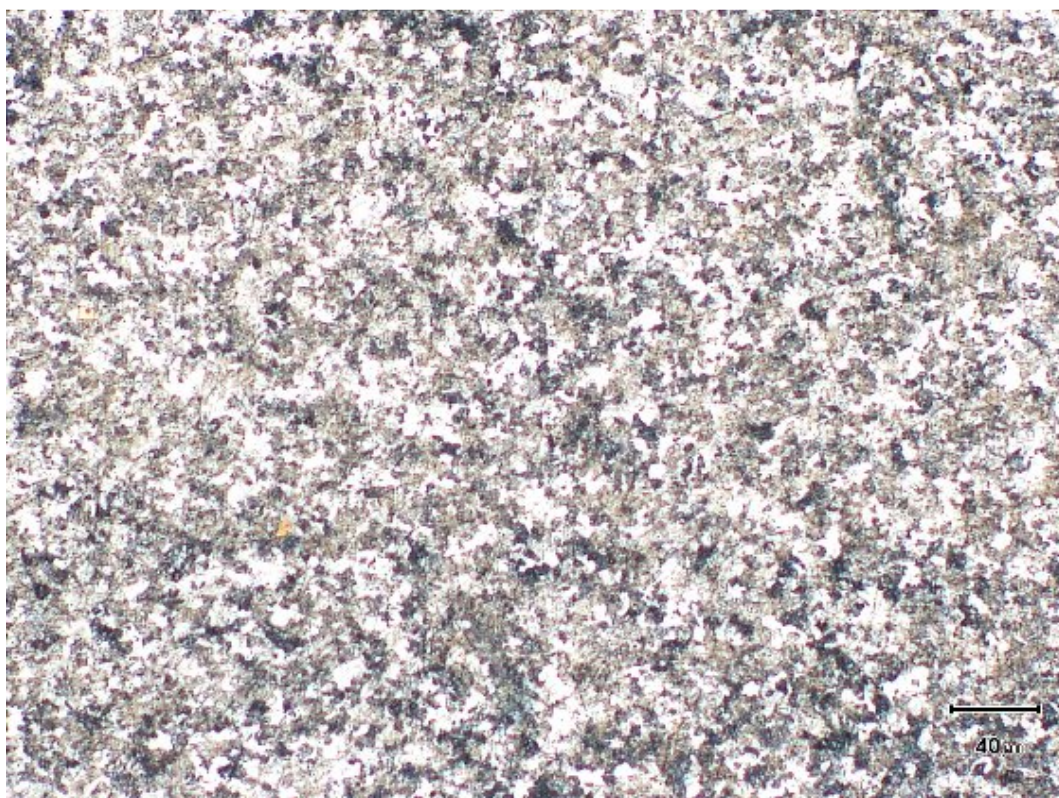
Obr. 5.31 Mikrostruktura přechodu tepelně ovlivněné oblasti do svaru



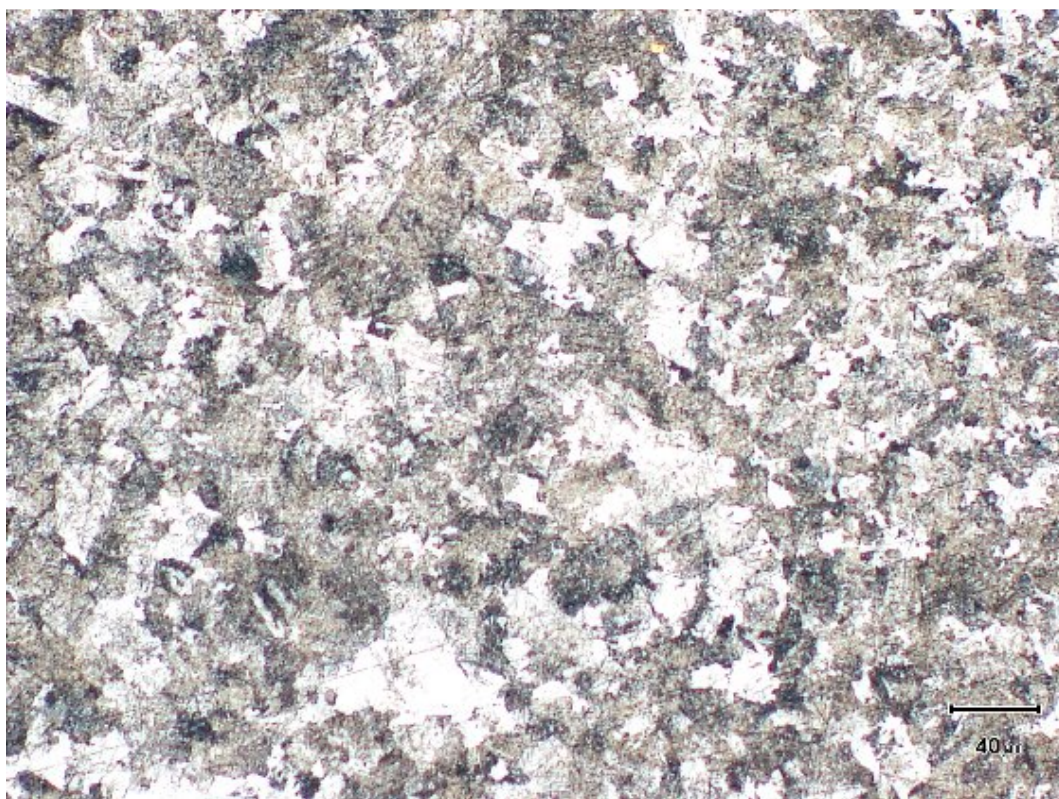
Obr. 5.32 Mikrostruktura svaru

Mikrostruktury svarového spoje DOMEX 550

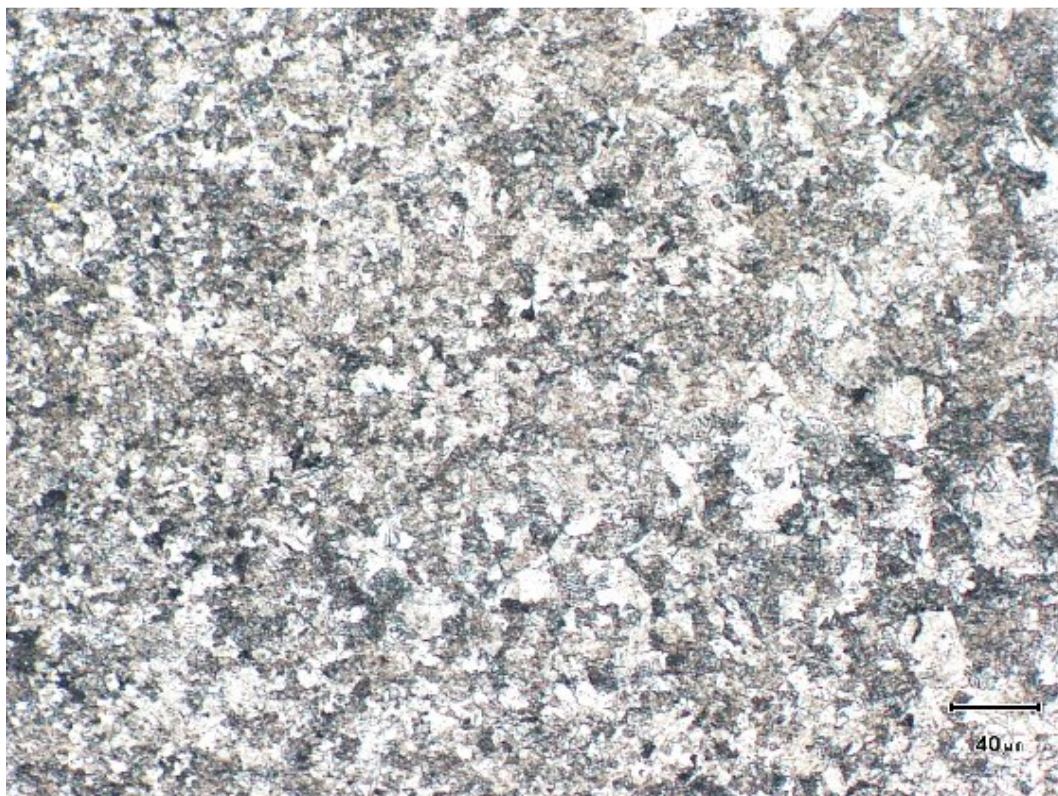
Na obr. 5.27 základního materiálu je velmi jemnozrnná silně deformovaná struktura feritu s řádkovitým vyloučením bainitu (pravděpodobně i části martenzitu). V tepelně ovlivněné oblasti (obr. 5.29 a obr. 5.31) přechází do jehlicovité hrubozrnné struktury a ve svarovém kovu je výrazný jehlicovitý acikulární ferit (obr. 5.30 a obr. 5.32). Ocel nemá legující přísady a přetavením se veškeré zpevňující procesy vyruší.



Obr. 5.33 Mikrostruktura základního materiálu



Obr. 5.34 Mikrostruktura přechodu tepelně ovlivněné oblasti do svaru



Obr. 5.35 Mikrostruktura svaru

Mikrostruktury svarového spoje HARDOX 400

Jemná struktura vysoce popuštěného martenzitu, bainitu a malé části feritu na obr. 5.33, v tepelně ovlivněné oblasti na obr. 5.34 je zhrublá a ve svarovém kovu na obr. 5.35 je opět s menším zrnem.

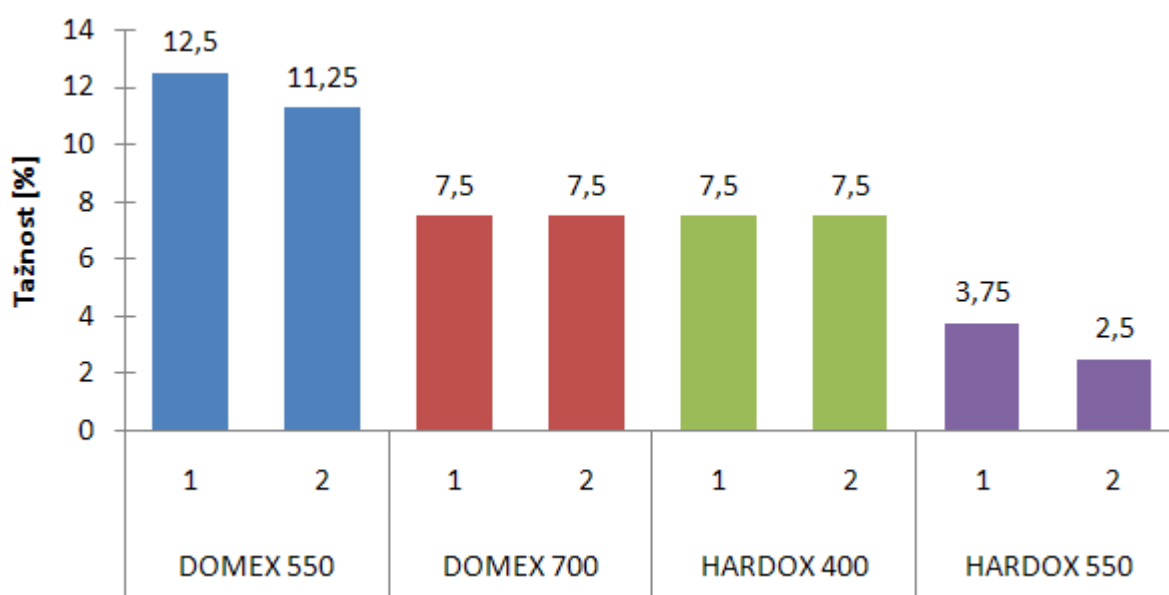
6. TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Experimentální část práce tvořilo plazmové svařování vysokopevnostních a otěruvzdorných plechů DOMEX 550, DOMEX 700, HARDOX 400 A HARDOX550.

Svařování bylo provedeno bez přídavného materiálu metodou svařování klíčovou dírkou (key hole welding). Parametry svařování byly odladěné na několika zkušebních svarech, aby bylo dosaženo spolehlivého protavení kořene svaru.

Při měření tvrdosti podle Vickerse HV10 (v oblasti ZM-TOO-SK-TOO-ZM) došlo pouze u oceli DOMEX 550 k mírnému nárůstu tvrdosti, jinak lze říct u všech vzorků můžeme sledovat pokles tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti. Což může přispět ke snížení pevnosti svarového spoje a navíc pokles tvrdosti znamená i pokles pevnostních charakteristik. Ocel HARDOX 550 nedosáhla z daleka tvrdostí, které by se předpokládaly. Tento jev lze připsat snaze o snížení vneseného tepla, zmenšením průměru trysky, což ale zapříčinilo zvětšení tepelně ovlivněné oblasti a promítlo se to i do ostatních zkoušek experimentu. Vzhledem k procesu svařování se u otěruvzdorných ocelí nedalo předpokládat udržení mechanických vlastností.

V další části experimentální práce byl hodnocen vliv tepelného dělení plazmovým obloukem na změnu vlastností okraje řezu. Tepelný účinek plazmového řezání vede k metalurgickým změnám v teplem ovlivněné oblasti. U oceli DOMEX došlo k velice mírnému nárůstu tvrdosti (kolem 30 HV), naopak u obou ocelí HARDOX došlo k poklesu tvrdosti ve střední části až o 100 HV. Řezání plazmou je přitom jedna z doporučených metod pro řezání vysokopevnostních ocelí a plně vyhovuje.



Obr. 6.1 Porovnání tažností svařovaných vzorků

Z naměřených hodnot a z grafů z tahových zkoušek lze zhodnotit, že materiály nemají výraznou mez kluzu. Jejich tažnost můžeme porovnat z grafu na obr. 6.1. Materiál DOMEX 550 dosáhl nejvyšší tažnosti, naopak u HARDOX 550 je tažnost oproti ostatním materiálům velmi malá. Tento pokles tažnosti o několik procent zřejmě zapříčinila, stejně jako při měření tvrdosti, zvětšená tepelně ovlivněná oblast.

Překvapivě dobré výsledky prokázala zkouška lámavosti ze strany svaru, kdy od každého materiálu byly zkoušeny dva vzorky. Materiály DOMEX 550 a HARDOX 400 dosáhly úhlu ohybu 180° bez většího porušení svaru u obou vzorků, což lze považovat za plně vyhovující svarový spoj. U ostatních ocelí byly úhly ohybu kolem 110°.

U metalografické kontroly makrostruktur se ve svarech neprojevily žádné vady a svary byly čisté. Svary byly typické pro plazmové svařování s charakteristickým tvarem kořene svaru. Ve svarovém kovu jsou na makrovýbrusu viditelné dendrity vycházející z rozhraní tuhá fáze a tavenina.

V mikrostruktuře materiálu DOMEX 550 můžeme vidět strukturu vysoce popuštěného martenzitu, bainitu a malé části feritu. V tepelně ovlivněné oblasti se změnilo do jehlicovité hrubozrnné struktury a dále jsou vidět výrazné jehlice feritu ve svarovém kovu. U základního materiálu HARDOX 400 je jemná struktura vysoce popuštěného martenzitu, bainitu a malé části feritu. Dále v tepelně ovlivněné oblasti struktura zhrubne a ve svaru je již opět s jemnějším zrnem. Mikrostrukturní analýza se provedla jen u dvou typů ocelí.

7. ZÁVĚR

Práce se věnuje problematice plazmového svařování vysokopevnostních a otěruvzdorných plechů DOMEX a HARDOX. Experiment byl z části proveden u firmy Fronius Praha s použitím svařovacího zařízení TRANSTIG 4000 + Plasmamodule 10 s mechanizovaným pojezdem a pro poslední vzorek HARDOX 550 bylo použito zařízení od firmy Castolin S. A. typu EUTRONIC GAP 3000. V obou případech se svařovalo bez přídavného materiálu metodou svařování klíčovou dírkou.

Na zvolených materiálových vzorcích bylo provedeno odladění svařovacích parametrů na zkušebních svarech, aby nenastal problém s neprůvazy kořenů, nebo jinými vadami svaru. Svary, které byly dle konečných parametrů, byly typického tvaru pro plazmové svařování, čisté a bez zjevných vad.

Za zmínku stojí experimentální snaha o snížení vneseného tepla u materiálu HARDOX 550, použitím jiných parametrů, především menší trysky. Tento záměr se ale příliš nezdařil, jelikož v důsledku potřebné nižší svařovací rychlosti se viditelně zvětšila tepelně ovlivněná oblast kolem svarového spoje. Toto ovlivnění zapříčinilo ztrátu mechanických vlastností svarového spoje. Pro zvýšení otěruvzdornosti lze na vlastní svar navařit tvrdonávarový kov, který zajistí stejnou odolnost jako základní materiál. Ostatní materiály neprojevily výraznou změnu svých vlastností po svařování. V experimentu byly provedeny zkoušky tvrdosti, příčná zkouška tahem, zkouška lámavosti a pro kontrolu metalografické zkoušky makrostruktur a mikrostruktur.

V rámci snížení hmotnosti a zvyšujících se požadavků na minimální ovlivnění vlastností svaru se stále více prosazuje použití vysokopevnostních ocelí. Díky nízkému obsahu uhlíku jsou tyto oceli dobře svařitelné. V oblasti svařování tenkých plechů se stává plazmové svařování významnou metodou, protože je zaručena vysoká stabilita a produktivita procesu při minimálním tepelném ovlivnění základního materiálu. Při použití vysokopevnostních ocelí a metody plazmového svařování nelze počítat s úsporou finančních nákladů. Lze ale získat velice kvalitní svarové spoje s vysokou pevností. Vhodnost dané kombinace vysokopevnostních materiálů a metody plazmového svařování již záleží na konkrétní aplikaci a finančních možnostech.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *All for power* [online]. c2007 [cit. 2011-04-24]. Svařování ocelí s vyšší pevností. Dostupné z WWW: <[Http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/svarovani%20oceli%20vys%20pevnosti.pdf](http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/svarovani%20oceli%20vys%20pevnosti.pdf)>. ISSN 1802-8535.
2. *ConVERTER* [online]. c2002 [cit. 2011-05-22]. Zkouška tvrdosti dle Vickerse. Dostupné z WWW: <<http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>>.
3. *EAMOS* [online]. c2002 [cit. 2011-05-22]. Statická zkouška tahem. Dostupné z WWW: <eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_tech/externi/kat_tech_2146/2.1.1_staticka_zkouska_tahem.doc>.
4. *ESAB : Welding & Cutting* [online]. c2009 [cit. 2011-04-24]. Visit <http://www.esab.com/> for more information about our products. Svařování plazmou. Dostupné z WWW: <<http://www.esab.cz/cz/cz/education/processes-paw.cfm>>.
5. *FRONIUS* [online]. C2008 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.fronius.com/>>.
6. *GAMA OCEL s.r.o. Ratíškovice* [online]. c2011 [cit. 2011-05-02]. Svařování otěruvzdorných a konstrukčních plechů. Dostupné z WWW: <<http://www.gamaocel.cz/4863/svarovani/>>.
7. *IDOC* [online]. c2007 [cit. 2011-04-20]. Plazmové svařování (navarování). Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-01-15.pdf>>.
8. *INTERCUT : Intercut - Svařovací technika, řezací stroje Svařovací technika, svařovací stroje, plazmové řezací stroje, tmely a lepidla* [online]. c2006 [cit. 2011-04-24]. INVERTOROVÉ ZDROJE PRO SVAŘOVÁNÍ PLASMOU. Dostupné z WWW: <<http://www.intercut.cz/texty/svarovani-plasmou.pdf>>.
9. Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava : Zeross, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
10. Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vyd. Ostrava : Zeross, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
11. KUNCIPÁL, Josef ; PILOUS, Václav ; DUNOVSKÝ, Jiří . *Nové technologie ve svařování*. vydání první. Praha : SNTL, 1984. 292 s.
12. *Migwelding* [online]. c2000 [cit. 2011-04-20]. Welding Weldom or RQT or (generic) S690 Steels. Dostupné z WWW: <<http://www.mig-welding.co.uk/weldom.htm>>.
13. *MMWELDING* [online]. c2011 [cit. 2011-04-24]. TransTig 4000. Dostupné z WWW: <<http://www.mmwelding.cz/prodej-stroju-a-prislusenstvi/prodej-svarovacich-stroju/tig-inventory/transtig-4000>>.

14. SCHLIXBIER, Michal. Trendy vývoje svařování plazmou. *Časopis KONSTRUKCE* [online]. 7.9.2005, 4, [cit. 2011-05-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/trendy-vyvoje-svarovani-plazmou/>>. ISSN 1803-8433.
15. SCHLIXBIER, Michal. Trendy vývoje svařování plazmou. *Časopis KONSTRUKCE*. 7.9.2005, 4, s. 106-107.
16. SSAB [online]. 2003 [cit. 2011-04-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.ssab.com/>>.
17. *Stal-Hurt - Hardox* [online]. 2008 [cit. 2011-05-02]. PROGRAM HARDOX. Dostupné z WWW: <<http://www.stal-hurt.com/hardox.php>>.
18. *Stavební technika* [online]. c2010 [cit. 2011-04-24]. Hardox – otěruvzdorný plech. Dostupné z WWW: <<http://stavebni-technika.cz/clanky/hardox-oteruvzdorny-plech/>>.
19. *Strojírenství pro střední školy* [online]. 2011 [cit. 2011-05-02]. ZKOUŠKY SVAŘITELNOSTI . Dostupné z WWW: <<http://strojirenstvi-ucivo.blogspot.com/2011/03/3327-zkousky-svaritelnosti.html>>.
20. *TESYDO : Technické systémové dozory* [online]. 2008 [cit. 2011-04-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.tesydo.cz/>>.
21. *TOOLS FOR ALL YOUR TEACHING NEEDS* [online]. c2011 [cit. 2011-05-04]. Tensile testing. Dostupné z WWW: <<http://textbooks.elsevier.com/manualsprotectedtextbooks/9780750663809/Static/tensile/tensile1c.htm>>.
22. *Vlček* [online]. 2008 [cit. 2011-04-24]. Plazmové svařovací hořáky. Dostupné z WWW: <<http://www.vlceksvt.cz/pdf/ABIPLAS.pdf>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam	Jednotka
a	šířka vzorku	[mm]
A	tažnost	[%]
b	délka vzorku	[mm]
C_e	uhlíkový ekvivalent	[%]
F_m	maximální zatěžovací síla	[N]
HSS	high strenght steel	
I	proud	[A]
MIG/MAG	svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře	
MMA	ruční svařování obalenou elektrodou	
PAW	plasma arc welding	
p_v	tlak vzduchu	[bar]
Q_s	vnesené teplo	[kJ/mm]
r	vzdálenost od ústí plazmového hořáku	[mm]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
R_{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
SAV	svařování pod tavidlem	
SK	svarový kov	
S₀	počáteční průřez	[mm ²]
TIG/WIG	svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře	
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
U	napětí	[V]
v_ř	rychlost řezání	[mm/min]
v_t	rychlost tažení	[mm/min]
v_s	rychlost svařování	[mm/min]
ZM	základní materiál	